

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Аналіз на превентивні розрахунки до вибору типу параметрів реле
захисту від враження гірників електричним струмом**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-22ск

Олексій САМЧИК

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ірина КАСАТКІНА

Нормо контролер _____ к.т.н., доц. Ірина КАСАТКІНА

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Рір 2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

САМЧИК Олексій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз на превентивні розрахунки до вибору типу параметрів
реле захисту від враження гірників електричним струмом

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є Аналіз на превентивні
розрахунки до вибору типу параметрів реле захисту від враження гірників
електричним струмом
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Загальна характеристика системи електропостачання підземного
підприємства з видобутку залізної руди; II. Вибір уставки захисту по струму
нульової послідовності; III. Розрахунок підсилювача та вибір розмірів
магнітопроводу трансформатора струму нульової послідовності.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Система електропостачання підземного підприємства; II. Схема
заміщення електричної мережі 0.4 кВ залізорудної шахти; III. Розрахунок всіх
можливих поєднань провідності ізоляції робочого та суміжного фідера; IV.
Температурна стабілізація схеми захисту; V. Експериментальна перевірка
роботи схеми підсилювача.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ірина КАСАТКІНА		
II	Ірина КАСАТКІНА		
III	Ірина КАСАТКІНА		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Система електропостачання підземного підприємства	15.05.25
2	Схема заміщення електричної мережі	17.05.25
3	Вибір уставки захисту по струму	21.05.25
4	Розрахунок підсилювача	26.05.25
5	Вибір розмірів магнітопроводу трансформатора струму	31.05.25
6	Розрахунок поєднань провідності ізоляції фідера	04.05.25
7	Температурна стабілізація схеми захисту	10.06.25
8	Експериментальна перевірка роботи підсилювача	14.06.25

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олексій САМЧИК
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина КАСАТКІНА
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Аналіз на превентивні розрахунки до вибору типу параметрів реле захисту від враження гірників електричним струмом»

67 с., 8 рис., 9 літературних джерел

В роботі в загальному вигляді розглянуто питання електропостачання шахт, зокрема, детально досліджено розрахунок варіанту селективного реле витоку, яке базується на комплексу диспетчеризації та телемеханізації підземного електропостачання. Це питання є одним з найважливіших аспектів електропостачання підземних шахт, оскільки забезпечення належного рівня електричної безпеки в умовах підземних робіт є критично важливим для захисту не лише технічного обладнання, але й персоналу підприємства.

Однією з основних задач є правильне визначення уставок по струму нульової послідовності для реле захисту від враження електричним струмом в умовах ізольованого режиму нейтралі трансформатора. Правильний вибір уставки спрацьовування реле є вирішальним для забезпечення селективності спрацьовування системи захисту, що дозволяє уникнути знеструмлення великих ділянок шахти при виникненні нештатної ситуації.

Процес вибору уставок по струму нульової послідовності базується на глибокому аналізі особливостей роботи ізольованих нейтральних трансформаторів, що є основою для подальшого ефективного захисту від коротких замикань та витоків струму. Крім того, у роботі проведено розрахунок підсилювачів та визначено оптимальні розміри магнітопроводів трансформаторів струму нульової послідовності, що безпосередньо впливає на точність і надійність роботи системи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропоновані в роботі рекомендації можуть бути використані для вдосконалення наявних систем захисту електричних мереж на підземних підприємствах, що значно підвищить рівень безпеки та зменшить ризики аварій. Таким чином, отримані результати мають велике значення як для теоретичних, так і для практичних аспектів електробезпеки на гірничорудних підприємствах, що зможе покращити не лише умови праці, але й ефективність експлуатації підземних енергетичних систем.

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, РЕЛЕ ВИТОКУ, СТРУМ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ, ЗАХИСТ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Загальна характеристика системи електропостачання підземного підприємства з видобутку залізної руди.....	8
1.1. Система електропостачання підземного підприємства з видобутку залізної руди	8
1.2. Загальна характеристика системи електропостачання підземного підприємства.....	10
Розділ 2. Вибір уставки захисту по струму нульової послідовності	11
Розділ 3. Розрахунок підсилювача та вибір розмірів магнітопроводу трансформатора струму нульової послідовності	38
Висновки	63
Список використаних джерел	65

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Гірничорудні підприємства являють собою базові види промисловості для макро- та мікроекономіки України. Незважаючи на ту ситуацію, котра склалась в державі з 2014 року, ці види підприємств приносять свою роботу поповнюючи валютні запаси держави та ВВП.

Особливо вразливим моментом, який негативно впливає на роботу гірничих підприємств та їх електроенергетичних систем і комплексів зокрема, є питання електробезпеки підприємства. Цей факт, взагалі-то негативний, але по різному впливає на окремих споживачів і, що не менш важливо, на підвищену небезпечність для обслуговуючого персоналу.

Структура захисту від враження електричним струмом формується у відповідності до режиму нейтралі трансформатора СЕП того чи іншого підприємства. В умовах гірничих підприємств України застосовуються, згідно ПУЕ, системи з ізольованими нейтралями трансформатора та реле захисту, котрі налаштовують на «реле витоку». Ці реле превентивно відключають живлення, де виник контакт людина – фаза ЛЕП. Більшість існуючих реле, які застосовують в СЕП гірничорудних підприємств мають загальний недолік – неселективне спрацьовування, тобто сигнал на відключеному живленні поступає на вхідний автомат дільничної підстанції. В результаті цього при спрацьовуванні автомату вимикається – знеструмлюється всі ділянки живлення даної підстанції. При цьому ускладнюється процес поділу місця виникнення нештатної ситуації та виникають простой в роботі дільниць котрі не пов'язані з цим фактом.

Необхідно створити реле з селективністю їх дії. Проте процес ефективного функціонування буде залежати від правильності вибору їх головного технологічного параметру – уставки спрацьовування. На вирішення цієї задачі і спрямована мета даної випускної роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Загальна характеристика системи електропостачання підземного підприємства з видобутку залізної руди

1.1. Система електропостачання підземного підприємства з видобутку залізної руди

Система електропостачання підземного підприємства з видобутку залізної руди є складною і багаторівневою. Вона забезпечує безперебійне живлення всіх виробничих процесів, транспорту, вентиляції, освітлення та систем безпеки.

Основне живлення надходить із зовнішньої мережі через головну підстанцію 110/35/6(10) кВ. У підземну частину електроенергія подається через трансформаторні підстанції та кабельні лінії. Напруга знижується до рівнів 6 кВ і 0,4 кВ залежно від споживачів.

Особлива увага приділяється вибухобезпеці, тому використовується спеціальне електрообладнання. Система включає резервні джерела живлення, зокрема дизель-генератори. Застосовуються засоби захисту від перенавантажень і коротких замикань.

Сучасні рудники впроваджують автоматизацію, моніторинг та енергоефективні технології. Це підвищує надійність і безпеку роботи шахти.
[1]

Одним із головних напрямів є підвищення енергоефективності виробництва шляхом модернізації електрообладнання та впровадження енергозберігаючих технологій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Самчик О.О.						8	3
Перевірив	Касаткіна І.В.							
Реценз.								
Н. Контр.	Касаткіна І.В.							
Затвердив	Пересунько І.І.				КНУ ЗЕЕМ-22ск			

Для шахт це означає застосування частотно-регульованих приводів, сучасних систем автоматизації та моніторингу споживання енергії. Стратегія також передбачає поступове зниження залежності від викопного палива та розвиток відновлюваних джерел енергії.

Підземні підприємства можуть використовувати сонячну енергію на поверхні для допоміжних потреб. Забезпечення надійності та безпеки електропостачання є ключовим завданням у контексті енергетичної безпеки. [2,3]

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Загальна характеристика системи електропостачання підземного підприємства

Система електропостачання підземного підприємства забезпечує енергією всі виробничі та допоміжні процеси, необхідні для видобутку корисних копалин. Живлення надходить із зовнішньої енергосистеми через головну підстанцію, де напруга знижується до рівнів 6 кВ або 10 кВ.

Електроенергія передається у підземну частину через кабельні лінії та шахтні трансформаторні підстанції, де далі знижується до 0,4 кВ для живлення споживачів.

Основними споживачами є бурильні установки, вентиляційні агрегати, конвеєри, насоси, освітлення та засоби зв'язку. В системі використовуються вибухозахищені пристрої, що відповідають умовам підвищеної небезпеки.

Для надійності передбачені резервні джерела живлення, зокрема дизель-генератори. Встановлюються сучасні пристрої релейного захисту та автоматики.

Система також включає засоби контролю та обліку споживаної електроенергії. Її надійна робота є критично важливою для безпеки та ефективності функціонування підприємства. [4,5,6]

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Вибір уставки захисту по струму нульової послідовності

Величина параметра при якому відбувається спрацювання захисту прийнято називати уставкою.

Один з двох параметрів селекції фідера дільничної підстанції при виникненні небезпеки – величина струму нульової послідовності.

Нижнє значення його, при якому спрацьовує захист – його уставка.

Визначення величини останньої, що забезпечує виконання вимог електробезпеки, умов експлуатації та встановлення наявних співвідношень між ними та оптимальним опором, провідністю фільтра і короткочасним струмом, є основною метою проведених досліджень. [7]

Для вибору уставки необхідно дослідити функціональну залежність між струмом нульової послідовності, безпечним заземленням струму при однофазному витоку, підключеним опором і провідністю в мережі.

Як перший крок у цьому напрямку складемо математичну модель розподільної мережі (рис.1.) та визначимо співвідношення послідовності.

Її функціонування при нештатній ситуації залежить від розподілу провідності ізоляції між окремими фідерами. [8,9]

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розробив</i>	Самчик О.О.				Розділ 2	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірив</i>	Касаткіна І.В.						11	28
<i>Реценз.</i>						КНУ ЗЕЕМ-22ск		
<i>Н. Контр.</i>	Касаткіна І.В.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.							

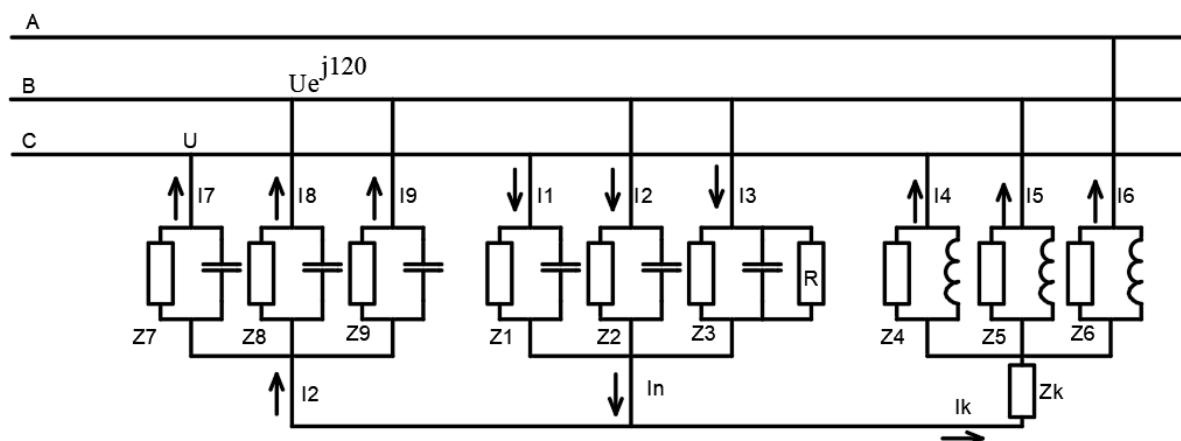


Рис.1. Схема заміщення електричної мережі 0.4 кВ залізорудної шахти.

$$Y_0 \cdot (U_a Y_1 + U_b Y_1 + U_c Y_1 + U_c Y_1) = Y_{HK}$$

$$U_a Y_2 + U_b Y_2 + U_c Y_2 = Y_{H2}$$

$$Y_0 \cdot (U_a + U_b + U_c) Y_1 = Y_{H2}$$

$$(U_a + U_b + U_c) Y_2 = Y_{H2}$$

$$(U_a + U_b + U_c) Y_x = Y_{HK}$$

$$Y_{H2} + \dots + Y_x = Y_{HM}$$

$$Y_{H2} + Y_{HK} = (U_a + U_b + U_c) Y_2 + (U_a + U_b + U_c) Y_x = Y_{HM}$$

$$Y_{HM} = (U_a + U_b + U_c) (Y_2 + Y_x)$$

Математична модель електричної мережі 0.4 кВ:

I_2, I_H, I_K – струм нульової послідовності суміжного, робочого резерву та фільтру.

Z_{1-3}, Z_{7-9} – опір ізоляції фаз мережі, резервів.

I_{1-9} – фазні струми витoku

U, U_e^{j120} – лінійна напруга мережі

R, J_0 – опір та струм однофазного витоку.

При складанні математичної моделі мережі кількість рівнянь дорівнює числу незалежних гілок електричного кола,

де ϕ – число резервів,

k – кількість фаз мережі, рівне 3,

1 – відображає наявність гілок однофазного витоку.

Математична модель розподілу струмів витоку при 5 фідерах описується системою з 21 лінійного рівняння, а при 13 фідерах – системою, що складається з 53 рівнянь. Провести аналіз, що залежить від 21 аргументу, не кажучи вже про 53, – вкрай складне, практично нерозв'язне завдання.

Поставлену мету можна досягти простіше, якщо розглядати не всі фідери підстанції, а обмежувати їх кількість. Дійсно, ємнісна та активна провідність ізоляції мережі розподіляється між окремими фідерами. Відомі нижня і верхня межі цих значень для фідера підстанції загалом.

Струм нульової послідовності I_n , на який реагує захист, повертається до шин станції через опір ізоляції суміжних фідерів.

Фільтр за характером своєї провідності може бути активно-ємнісним або індуктивно-активним. У першому випадку його провідність

$$Y_\phi = a + jb$$

У другому

$$Y_\phi = a - jb$$

При розрахунках будемо розглядати розподільчу мережу підстанції, що складається з двох резервів і фільтра. Математична модель такої системи описується системою з 13 рівнянь, як впливає з виразу

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$-z_5 i_5 + z_6 i_6 = U e^{j120.7}$$

$$-z_4 i_4 + z_5 i_5 = u$$

$$i_4 + i_5 + i_6 - i_k = 0$$

$$i_7 + i_8 + i_9 - i_2 = 0$$

$$-z_7 i_7 + z_9 i_9 = U$$

$$-z_7 i_8 + z_9 i_9 = U^{3j120.12}$$

$$i_k + i_2 - i_n = 0$$

$$z_2 i_2 + z_8 i_8 = 0$$

для індуктивно-активного фільтра та активно-емнісного фільтра імпеданс дорівнює

$$Z_k = x - jy$$

Розв'язувати цю систему рівнянь будемо методом Гауса виключення невідомих.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діаграма

										0	1	2	3	
	1	2	3							I0	Iн			=0
	1 i1	z2 i2												=U
		2 i2	z3 i3											=U e ^{j120}
			3 i3							r i0				=0
		2 i2			5 i5							k ik		=0
				z4 i4	5 i5									=U
					z5 i5	6 i6								=U e ^{j120}
				4	5	6								=0

0							z_7 i_7	8 i_8					$=U$
1								z_6 i_8	9 i_9		in	k	2 $=Ue^{j120}$
2											in	k	2 $=0$
3		z_2 i_2						z_8 i_8					$=0$

З 4-того рядка знайдемо $Z_3 I_3 - R J_0 = 0$.

Звідки $i_3 = (R I_0) / Z_3$

Додамо 3 та 4 рядки

З 9 рядка $i_7 + i_8 + i_9 = 0$, звідки:

$I_7 = I_2 - I_8 - I_9$ значення I_7 підставимо в 10 рядок. Тоді матриця буде мати наступний вигляд:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0	i1		i2	R i0/z3	0	0	0	0	0	0	i0	-in	0	0	=0
2	0	z1 i1		- z2 i2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= U
3	0	0		z2 i2	0	0	0	0	0	0	0	-r i0	0	0	0	= Ue j120
4	0	0		z2 i2	0	0	z5 i5	0	0	0	0	0	0	zk ik	0	=0
5	0	0		0	0	- z4 i4	z5 i5	0	0	0	0	0	0	0	0	= U
6	0	0		0	0	0	-z5 i5	z6 i6	0	0	0	0	0	0	0	= Ue j120
7	0	0		0	0	i4	i5	i6	0	0	0	0	0	-ik	0	=0
8	0	0		0	0	0	0	0	0	i8(z7+z9) z7 i9	0	0	0	0	- z7 i2	= U
9	0	0		0	0	0	0	0	0	z8 i8 + z9 i9	0	0	0	0	0	= Ue j120
10	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	-in	ik	i2	0
11	0	0		- z2 i2	0	0	0	0	0	-z8 i8	0	0	0	0	0	0

					5					0	1	2	3	
	1	2			0					i0	in			0
	1	z2			0									U
	i1	i2												
		z2			0					r i0				Ue^{j1} 20
		2			z5 i5							z4		0
		i2										ik		
					(z4+z5)							z4		U
					i5	4 i6						ik		
					-z5 i5									Ue^{j1} 20
						6 i6								
0		i2			0				7				z7	U
								i9					i2	
1		2			0				9					Ue^{j1} 20
		i2						i9						
2					0						-in	ik	2	0

Де:

$$a = R + \frac{Z_3}{Z_3}$$

$$b = -z_2 \left(1 + \frac{z_3}{z_R} \right)$$

3 11 рядка

$$I_9 = \frac{ue^{j120} - z_2 i_2}{z_9}$$

3 7 рядка

$$I_6 = \frac{ue^{120} + z_5 i_5}{z_6}$$

3 2 рядка

$$i_1 = \frac{u + z_2 i_2}{z_1}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

	2	5	1	1	1	1	
			0	1	2	3	
1	k	0	a	-	0	0	=
	i2		i0	in			-(U/z1)
3	z	0	-r	0	0	0	=
	2 i2		i0				Ue ^{j120}
5	z	0	-r	0	0	0	=
	2 i2		i0				0
6	0	m	0	0	-	0	=
		i5			z4 ik		U-
							(z4/z6)
							Ue ^{j120}
10	bi	0	0	0	0	-	=
	2+Li2					z7 i2	U-
							(z7/z9)
							Ue ^{j120}
12	0	0	0	-	ik	i2	=
			in				0

Де

$$K = 1 + \frac{z_2}{z_1}$$

$$m = z_4 + z_5 + \frac{z_4 z_5}{z_6}$$

$$L = \frac{-z_2 z_7}{z_9}$$

3 3 рядка

$$i_2 = \frac{ue^{j120} + r_j 0}{z_2}$$

	5	10	1	1	1	
			1	2	3	
1	0	((KR/z2) + a)/i0	- in	0	0	=- ((U/z1) + (k/z2) Ue ^{j120})
5	z 5 i5	R i0	0	z k ik	0	=- Ue ^{j120}
6	m i5	0	0	- z4 ik	0	=U- (z4/z6) Ue ^{j120}
10	0	q R i0	0	0	- z7 i2	=U- ((z7/z9) + q) Ue ^{j120}
12	0	0	- in	ik	i2	=0

де

$$q = \frac{b + L}{z_2}$$

3 5 рядка

$$i_5 = - \frac{ue^{j120} + r_i 0 + z_k i_k}{z_5}$$

Формула 1

$$\left(\frac{KR}{Z_2} + a\right) I_0 - I_n = - \left(\frac{U}{Z_1} + \frac{K}{Z_2} \cdot Ue^{j120}\right)$$

Формула 16

$$\frac{mR}{z_5} I_0 - \frac{(mZ_k + z_4 z_5)}{z_5} I_k = U + \left(\frac{m}{z_5} - \frac{z_4}{z_6} \right) U e^{j120}$$

Формула 10

$$qri_0 - z_1 z_2 = u - \left(\frac{z_1}{z_9} + q \right) u e^{120}$$

Для скорочення записів, ведемо позначення

$$\frac{Kr}{z_2} + a = c$$

$$- \left(\frac{u}{z_1} + \frac{k}{z_2} u e^{120} \right) = b$$

$$- \frac{mr}{z_5} = z$$

$$- \frac{mZ_k + z_4 z_5}{z_5} = m$$

$$u + \left(\frac{m}{z_5} + \frac{z_4}{z_6} \right) u e^{120} = a$$

$$f = q r$$

$$u - \left(\frac{z_7}{z_9} = q \right) u e^{120} = D$$

Тепер система буде мати наступний вигляд

$$\begin{array}{cccc} c & -1 & 0 & 0 \\ z & 0 & m & 0 \\ f & 0 & 0 & -z_1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \end{array}$$

Де:

$$M = -\frac{mz_k + z_4z_5}{z_5}$$

$$m = z_4 + z_5 + \frac{z_4z_5}{z_6}$$

$$z = -\frac{mr}{z_5}$$

$$f = q r$$

При симетричному фільтрі напруга нульової послідовності $z_4=z_5=z_6$

$$b = b + \frac{l}{z_2} \cdot r$$

$$l = \frac{z_7z_2}{z_9}$$

$$c = \frac{kr}{z_2} + a$$

$$k = 1 + \frac{z_2}{z_1}$$

$$a = r + \frac{z_3}{z_3}$$

$$m = 3z_4$$

$$z = -3r$$

$$m = -\frac{3z_4z_k + z_4^2}{z_4} = -3z_k + z_4$$

$$\frac{b+l}{z_2} = -\left(1 + \frac{z_1}{z_8} + \frac{z_1}{z_9}\right)$$

При симетричному опорі ізоляції:

$$Z_1=Z_2=Z_3$$

$$Z_7=Z_8=Z_9$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \det &= -\left(1 + \frac{3r}{z_1}\right)(3z_k + z_4)z_7 - 3rz_7 - 3r(3z_k + z_4) \\ &= -\left(z_1 + \frac{3r}{z_1}\right)(3z_k + z_4)z_7 - 3rz_7 - 3r(3z_k + z_4) \\ &= -\frac{(z_1 + 3r)(3z_k + z_4)z_7 + 3rz_1z_7 + 3r(3z_k + z_4)z_1}{z_1} \\ &= -\frac{(3z_k + z_4)(3rz_1 + z_7z_1 + 3r) + 3rz_7z_1}{z_1} \\ \det &= -\frac{(3z_k + z_4)(3rz_1 + z_7z_1 + 3r) - 3rz_1z_7}{z_1} \end{aligned}$$

Визначимо струм однофазного витоку

$$\begin{aligned} \det I_0 &= \begin{vmatrix} b & -1 & 0 & 0 \\ a & 0 & m & 0 \\ d & 0 & 0 & -z_1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a & m & 0 & b & 0 & 0 \\ d & 0 & -z_1 & -a & m & 0 \\ 0 & 1 & 1 & d & 0 & -z_7 \end{vmatrix} = \\ &= -1 \cdot \begin{vmatrix} a & 0 \\ d & -z_7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a & m \\ d & 0 \end{vmatrix} \\ & \quad z_7 \cdot \begin{vmatrix} b & 0 \\ a & m \end{vmatrix} = az_7 - dm + z_7bm \end{aligned}$$

При симетричному фільтрі напруга нульової послідовності і симетричного опору ізоляції:

$$= u + ue^{j120} \left(\frac{m}{z_5} - \frac{z_4}{z_6} \right) = u + ue^{j120} \left(\frac{3z_4}{z_4} - \frac{z_4}{z_4} \right) = u + 2ue^{j120} = j\sqrt{3} \cdot u$$

$$b = - \left(\frac{u}{z_1} + \frac{ke^{j120}}{z_2} \right) = - \left(\frac{u + 2ue^{j120}}{z_1} \right) = -j\sqrt{3} \cdot \frac{u}{z_1}$$

$$d = u - \left(\frac{z_1}{z_9} + q \right) ue^{j120} = u - (1 - 3)ue^{j120} = U = 2ue^{j120} = j\sqrt{3} \cdot U$$

$$q = \frac{b + l}{z_2}, \quad b = -z_2 \left(1 - \frac{z_7}{z_8} \right) = -2z_2$$

$$l = -\frac{z_1 z_2}{z_9} = -z_2$$

$$g = \frac{-2z_2 - z_2}{z_2} = -3$$

$$\begin{aligned} \det i_0 &= j\sqrt{3} \cdot uz_7 + j\sqrt{3} \cdot u(3z_k + z_4) + z_7 \left(\frac{j\sqrt{3}U}{z_1} \right) (3z_k + z_4) \\ &= j\sqrt{3}U \left(\frac{z_1(z_7 + 3z_k + z_4) + z_7(3z_k + z_4)}{z_1} \right) \end{aligned}$$

Виразуємо струм нульової послідовності в робочому фідері:

$$\det I_{11} = \begin{vmatrix} c & b & 0 & 0 \\ z & a & m & 0 \\ b & d & 0 & -z_7 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} z & b & 0 \\ -1 \cdot z & a & 0 \\ f & d & -z_7 \end{vmatrix} +$$

$$\begin{vmatrix} c & b & 0 \\ z & a & m \\ f & d & 0 \end{vmatrix} =$$

$$z_8 \cdot \begin{vmatrix} c & b \\ z & a \end{vmatrix} -$$

$$m \cdot \begin{vmatrix} c & b \\ f & d \end{vmatrix} =$$

$$z-ca - z_1rb - mcd + mfb$$

При симетричному фільтрі напруга нульової послідовності і симетричному опорі ізоляції, підставляючи отримані рівняння отримаємо:

$$\begin{aligned} \det in &= \frac{z_7(z_1 + 3r)}{z_1} \cdot j\sqrt{3} \cdot u - j \cdot \frac{\sqrt{3}u}{z_1} \cdot z_7 \cdot 3r + \frac{(3z_k + z_4)(z_1 + 3r)}{z_1} \\ &\cdot \left(j\sqrt{3}u - \frac{(3z_k + z_4)3r \cdot j\sqrt{3}u}{z_1} \right) \\ &= j\sqrt{3}u \\ &\cdot z_1(z_1(z_1 + 3r) - z_1 \cdot 3r + (3z_k + z_4)(z_1 + 3r) - (3z_k + z_4) \cdot 3r) \\ &= \frac{j\sqrt{3}u}{z_1} (z_7z_1 + 3z_kz_1 + z_4z_1) = j\sqrt{3}u \cdot (z_7 + 3z_k + z_4) \end{aligned}$$

$$I_{11} = \frac{\det I_n}{\det} = \frac{j\sqrt{3}u((z_7 + 3z_k + z_4)z_1)}{-((z_4 + 3z_k)(3rz_1 + z_7)z_1 + 3r) - 3z_1z_7r^2}$$

Виразуємо струм нульової послідовності в суміжному фідері:

$$\det i_2 = \begin{vmatrix} c & -1 & 0 & b \\ z & 0 & m & a \\ f & 0 & 0 & d \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r & m & a & c \\ f & 0 & d-r & m \\ 0 & 1 & 0 & f \\ 0 & 1 & 0 & d \end{vmatrix} = fa - zd - cmd + fmb$$

При симетричному фільтрі напруга нульової послідовності і симетричному опорі ізоляції

$$\det i_2 = -3rj\sqrt{3}u + 3rj\sqrt{3}u + \frac{z_1 + 3r}{z_1} (3z_k + z_4)j\sqrt{3}u - 3r(3z_k + z_4) \frac{j\sqrt{3}u}{z_1} \\ = j\sqrt{3}u(3z_k + z_4)$$

$$i_2 = \frac{\det i_2}{\det} = \frac{j\sqrt{3}u(3z_k + z_4)z_1}{-(3z_k + z_4)(3rz_1 + z_7(z_1 + 3r) - 3rz_7z_1)} = \\ = j\sqrt{3}u \cdot \frac{3z_k + z_4}{-3(3z_k + z_4) \left(3r + z_7 \left(1 + \frac{3r}{z_1} \right) - 3z_7r \right)}$$

Виразуємо струм нульової послідовності в фільтрі напруги нульової послідовності.

При симетричному фільтрі напруги нульової послідовності і симетричному опорі ізоляції:

$$I_k = \begin{pmatrix} c & -1 & b & 0 \\ r & 0 & a & 0 \\ f & 0 & d & -z_7 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z & a & 0 \\ f & d & -z_7 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - m \begin{pmatrix} z & b & 0 \\ r & a & d \\ f & d & -z_7 \end{pmatrix} \\ = zd - af + caz_7 - brz_7$$

З отриманого рівняння для струму нульової послідовності робочого фідера І_н, виразуємо опір однофазного витoku:

$$r = j\sqrt{3}u \cdot (z_4 + z_7 + 3z_k) + in \cdot z_7 \cdot (z_4 + 3z_k) \\ = -r3in(z_7 \cdot (z_4 + 3z_k + z_7) + z_7 \cdot (z_4 + 3z_k))/z_1$$

$$r = \frac{j\sqrt{3}u \cdot (z_4 + z_7 + 3z_k) + in \cdot z_7 \cdot (z_4 + 3z_k)}{3in \cdot (z_1 \cdot (z_4 + 3z_k + z_7) + z_7 \cdot (z_4 + 3z_k))}$$

$$i_k = j\sqrt{3}u \cdot \left(\frac{z_7}{-(3z_k + z_4) \cdot \left(3 + z_7 \cdot \left(1 + \frac{3}{z_1} \right) \right) - 3z_7} \right)$$

$$i_0 = j\sqrt{3}u \cdot \left(\frac{z_1 \cdot (z_7 + 3z_k + z_4) + z_7 \cdot (3z + z_4)}{-((z_4 + ez_k) \cdot (3rz_1 + z_7 \cdot (z_1 + 3r)) - 3rz_7 \cdot z_1)} \right)$$

$$i_0 = j\sqrt{3}u \cdot \left(\frac{z_1 \cdot (z_7 + 3z_k + z_4) + z_7 \cdot (3z + z_4)}{-((z_4 + ez_k) \cdot (3rz_1 + z_7 \cdot (z_1 + 3r)) - 3z_7 \cdot z_1)} \right)$$

$$r = j\sqrt{3}u \cdot ((z_4 + z_7 + 3z_k) \cdot z_1 + in \cdot z_7 \cdot z_1 \cdot (z_4 + 3z_k)) \\ = \frac{3in \cdot (z_1 \cdot (z_4 + ez_k + z_7) + z_7 \cdot (z_4 + 3z_k))}{3in}$$

r

$$= \frac{-6 \cdot (z_1 + a) + \sqrt{36 \cdot (x_1 + a)^2 - 36 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2x_1a + y_1^2 + 2y_1b) \cdot \left(\left(1 - 3 \cdot \frac{u^2}{in^2} \cdot (a_7 + x_1)^2 + (b_1 + y_1r)^2 \right) \right)}}{18 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2ax_1 + y_1^2 + 2by_1)}$$

$$i_u = u \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot (a + x_1)^2 + (b + y_1)^2}{3ar + 3x_1r + 1^2 + (36r + 3y_1r)^2}}$$

$$i_k = u \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot (a + x_1)^2 + (b + y_1)^2}{3a + 3x_1 + 1^2 + 9(6r + 3y_1)^2}}$$

$$r = \frac{-6 \cdot (z_1 + a) + \sqrt{36 \cdot (x_1 + a)^2 - 36 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2x_1a + y_1^2 + 2y_1b) \cdot \left(\left(1 - 3 \cdot \frac{u^2}{in^2} \cdot (a_7 + x_1)^2 + (b_1 + y_1r)^2 \right) \right)}}{18 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2ax_1 + y_1^2 + 2by_1)}$$

$$a = a_7 + u, \quad b = b_7 + m, \quad m = \frac{x}{x^2 + y^2}, \quad y_1 = \frac{y}{x^2 + y^2}$$

В результаті розрахунків, отримуємо вираз в комплексній формі, для знаходження параметрів виконуємо:

Короткочасний струм, при мінімальному опорі тіла людини:

$$i_k = j\sqrt{3}u \cdot \left(\frac{z_7}{-(3z_k + z_4) \cdot \left(3 + z_7 \cdot \left(1 + \frac{3}{z_1} \right) \right) - 3z_7} \right)$$

Допустимо безпечний для людини струм:

$$i_0 = j\sqrt{3}u \cdot \left(\frac{z_1 \cdot (z_7 + 3z_k + z_4) + z_7 \cdot (3z + z_4)}{-((z_4 + ez_k) \cdot (3rz_1 + z_7 \cdot (z_1 + 3r)) - 3rz_7 \cdot z_1)} \right)$$

Опір:

$$\begin{aligned} r &= j\sqrt{3}u \cdot ((z_4 + z_7 + 3z_k) \cdot z_1 + in \cdot z_7 \cdot z_1 \cdot (z_4 + 3z_k)) \\ &= \frac{3in \cdot (z_1 \cdot (z_4 + ez_k + z_7) + z_7 \cdot (z_4 + 3z_k))}{3in} \end{aligned}$$

Видаляємо комплексні параметри, і отримаємо:

При активно ємнісному фільтрі:

$$r = \frac{-6 \cdot (z_1 + a) + \sqrt{36 \cdot (x_1 + a)^2 - 36 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2x_1a + y_1^2 + 2y_1b) \cdot \left(\left(1 - 3 \cdot \frac{u^2}{in^2} \cdot (a_7 + x_1)^2 + (b_1 + y_1r)^2 \right) \right)}}{18 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2ax_1 + y_1^2 + 2by_1)}$$

При активно – індуктивному фільтрі:

$$r = \frac{-6 \cdot (z_1 + a) + \sqrt{36 \cdot (x_1 + a)^2 - 36 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2x_1a + y_1^2 + 2y_1b) \cdot \left(\left(1 - 3 \cdot \frac{u^2}{in^2} \cdot (a_7 + x_1)^2 + (b_1 + y_1r)^2 \right) \right)}}{18 \cdot (a^2 + b^2 + x_1^2 + 2ax_1 + y_1^2 + 2by_1)}$$

$$i_0 = u \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot (a + x_1)^2 + (b + y_1)^2}{3ar + 3x_1r + 1^2 + (36r + 3y_1r)^2}}$$

$$i_k = u \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot (a + x_1)^2 + (b + y_1)^2}{3u + 3x_1 + 1^2 + 9(6r + 3y_1)^2}}$$

В формулах

$$a = a_7 + n, \quad b = b_7 + m, \quad m = \frac{x}{x^2 + y^2}, \quad y_1 = \frac{y}{x^2 + y^2}$$

Де a, b - спільний активний і ємнісний провідності ізоляції розподільчої мережі

a_7, b_7, n, m – активна і ємнісна провідності робочого і суміжного фідерів

c_1, c_2 – ємність ізоляції робочого та суміжного фідерів

x_1, x_2 – активна та реактивна провідності фільтра

Рівняння (2) та (5) виражають залежність величини відключеного опору однофазного витоку від провідності ізоляції мережі та параметрів фільтра.

Рівняння (3) та (6) виражають залежність величини тривалого безпечного для людини струму від провідності ізоляції, опору фільтра та відключеного опору RRR , який визначається з рівняння (2) для ємнісного фільтра та рівняння (5) для індуктивного фільтра.

Залежності (4) та (7) — короточасний струм при мінімальному опорі тіла людини.

Вибір оптимальних параметрів фільтра та струму уставки здійснюється методом перетворення варіантів.

Розрахунок для одного варіанту здійснюється за наступною послідовністю: для взятій пари X, Y визначається максимальне значення короточасного струму. Спочатку проводиться перевірка виконання вимог:

$$\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \leq k$$

$$i_0 \leq i_{\text{Б}}$$

У разі їх невиконання, пара X , Y виключається з розрахунку. Перебираючи всі пари X , Y та порівнюючи отримані значення короткочасного струму, визначається оптимальний опір фільтра для кожного варіанту, при якому струм буде мінімальним. Результати, отримані на ЕЦВМ, представлені у вигляді графічної залежності. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити такі висновки:

1. Взаємно протилежні вимоги до якості роботи захисту і зменшення величини короткочасного струму. Зниження мінімального вимкненого опору збільшує величину короткочасного струму. Як компромісне рішення доцільно вибрати коефіцієнт $k=1,5-2$.
2. Використання індуктивно активного фільтра порівняно з активним ємнісним підвищує безпеку експлуатації низьковольтних мереж. Зокрема, максимальний струм однофазної витоку зменшується.
3. Залежність струму однофазної витоку від активної ємнісної провідності ізоляції. Зниження опору ізоляції збільшує струм. З огляду на безпеку експлуатації мережі, вибір прийнятних варіантів захисту та опору ізоляції для надійності підземного електропостачання має бути в межах 4,5-6 кОм/фазу, а ємність ізоляції захисної ділянки мережі не повинна перевищувати 0,5 кОм/фазу.
4. Зниження уставки підвищує безпеку експлуатації мережі.

При великій кількості обособлених ділянок у мережі, підключених до загальної секції шин, сумарна провідність ізоляції суміжних резервів значно більша за провідність ізоляції пошкодженого фідера.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$i_{ni} = i_{nn} = i_0$$

При нульовій послідовності, що дорівнює току однофазної витоку, величина відключення стабільна (має сталу величину, незалежну від місця застосування витоку). Завдяки цьому усувається перезахист, і зменшується вплив високої експлуатаційної надійності електропостачання для гірничих ділянок.

Для підстанції з найбільшим числом фідерів ситуація значно інша. Величина відключеного току однофазної витоку суттєво змінюється в залежності від фідерів. Для її стабілізації необхідно створювати динамічну схему для токів витоку. До шин підстанції підключається трьохфазний фільтр. Провідність фільтра сумується з провідністю ізоляції суміжних фідерів.

Такий підхід дозволяє підвищити надійність системи та забезпечити стабільне відключення в разі пошкоджень.

Таким чином, струм нульової послідовності пошкодженого фідера, пропорційний тій провідності ізоляції мережі суміжних фідерів.

Тому при складанні математичної моделі для вибору уставки захисту необхідно враховувати провідність ізоляції кожного фідера окремо. Незалежно від кількості фідерів, підключених до загальної секції, достатньо розглядати для фідера з узагальненими параметрами.

Провідність ізоляції для пошкодженого фідера

$$0 < y_p < y_{\max}$$

$$y_{\text{см}} = \sum y = y - y_0$$

Також де y — сумарна провідність ізоляції розподільчої мережі, підключеної до неї.

Визначимо залежність між током однофазної течії та нульовою послідовністю. До секції шин підключено k фідерів, з яких $k-1$ замінимо одним фідером з еквівалентними параметрами, і далі визначимо залежність для двох фідерів. Провідність ізоляції для першого фідера позначається як y_1 , для k -того — y_k . Ток нульової послідовності пошкодженого фідера при однофазній течії на першому фідері позначається як i_{n1} , на довільному фідері i_{nk} .

Використовуючи систему рівнянь (2), перетворимо їх

$$\frac{i_0 - i_{n1}}{y_1} = \frac{i_{n1}}{\sum Y}$$

$$i_{n1} = \frac{\sum(y) \cdot i_0}{\sum(y)}$$

$$i_{nk} = \frac{\sum(y) \cdot i_0}{\sum(y)}$$

При проведенні досліджень охоплений весь порядок зміни провідності ізоляції розподільчих мереж, розібраний на окремі групи, що характеризують витоки токів. Інтервал вимірювання провідності ізоляції задано граничними та проміжними значеннями ємності та опору ізоляції мережі фідерів і підстанції.

Гранична ємність ізоляції суміжного фідера прийнята рівною ємності мережі підстанції, гранична ємність робочого фідера прийнята рівною максимальної ємності захисної ділянки мережі.

При програмуванні введені два приклади, виконання яких обов'язкове для всіх розглянутих поставлених задач.

$$\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \leq k$$

$$i_0 \leq i_B$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

де $R_{\max}$, $R_{\min}$ – максимальне та мінімальне значення відключеного опору однофазного витоку з рівнянь.

I_b – безпечний струм для людини

Величина струмів, які розглядаються в розрахунках:

K : 1.3, 1.5, 2.

$I_n=15,20$

$I_b=25,30$

X : 0,0.3,0.6,0.9,1.2,1.5,1.75,2,2.25,2.5,3.

Y : 0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.5,1.75,2,2.5,3.2,6.4.

Інтервал зміни активного опору ізоляції між окремими фідерами через відсутність визначених закономірностей його розподілу вважаємо рівним опору ізоляції семи підстанцій. Сума провідності ізоляції в мережі фідерів не повинна перевищувати провідності ізоляції всієї мережі, підключеної до загальної секції шин.

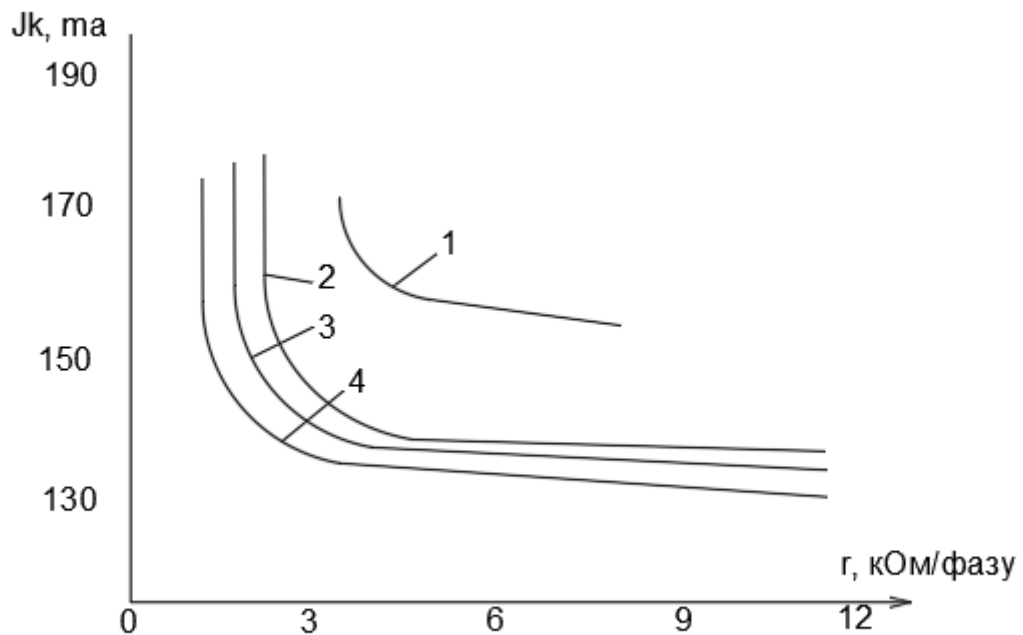
Алгоритм вирішення задачі будуємо наступним чином. Вариуємо величинами X , Y , визначаємо значення цих величин, при яких виконуються умови:

$$\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \leq k$$
$$i_0 \leq i_b$$

І мінімальний струм через людину має найменше значення при всіх розглянутих значеннях провідності ізоляції. При виборі параметрів захисту передбачено рішення задачі 240 варіантами початкових умов для активного ємнісного та індуктивно активного фільтрів. Загальна кількість варіантів становить 480.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура варіанту: Значення величин n , m , b_7 , q_7 вибираються в заданих інтервалах з кожною парою X , Y , взятих з рядів. В одному варіанті розглядається один режим зміни ємності ізоляції мережі і один варіант зміни активного опору ізоляції. Розрахунок проводиться для всіх можливих поєднань провідності ізоляції робочого та суміжного фідера. Перебираються елементи активного опору та ємності провідності ізоляції мережі.



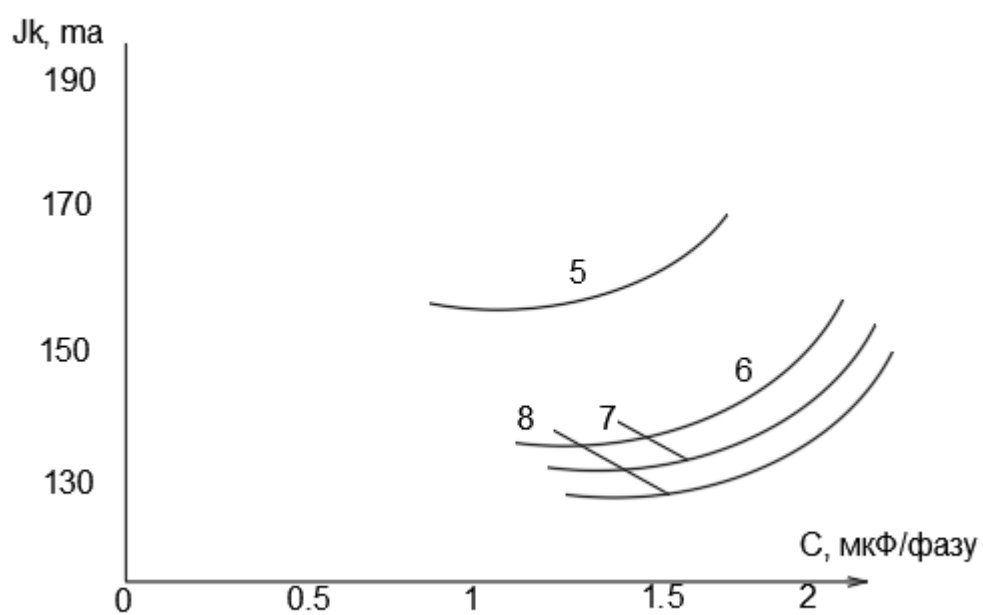


Рис.2. Залежності J_k від R .

1 — $C = 2$ мкФ / фазу

2 — $C = 1$ мкФ / фазу

3 — $C = 0,5$ мкФ / фазу

4 — $C = 0,25$ мкФ / фазу

5 — $Z = 1$ кОм / фазу

6 — $Z = 3$ кОм / фазу

7 — $Z = 6$ кОм / фазу

8 — $Z = 12$ кОм / фазу

Розділ 3. Розрахунок підсилювача та вибір розмірів магнітопроводу трансформатора струму нульової послідовності

До основних елементів селективного захисту від замикань на землю належать ТСНП і підсилювач. Параметри їх взаємопов'язані. Збільшення або зменшення розмірів сердечника трансформатора відповідно зменшує або збільшує необхідний коефіцієнт посилення підсилювача.

Одним з основних параметрів будь-якого пристрою, особливо захисту, є надійність роботи P , тобто ймовірність справного виконання покладених на нього функцій протягом заданого часу t :

$$P = e^{-\lambda t}$$

де λ – інтенсивність відмов

Для апаратури захисту загалом:

$$\lambda = 0,98 \cdot 10^{-5} \text{ 1/г}$$

а для підсилювача: $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/г}$

Тобто очевидно, що безвідмовність роботи захисту в основному залежить від системи надійності підсилювача. Параметри останнього визначаються потужністю входу, виходу та інтенсивних змін температури навколишнього середовища.

Нижня межа потужності входу (I_{33}) певним чином пов'язана з величиною безпечного струму, тобто значенням струму, протікання якого через людину не спричиняє небезпечних для неї наслідків.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Самчик О.О.				Розділ 3	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Касаткіна І.В.						39	25
Реценз.						КНУ ЗЕЕМ-22ск		
Н. Контр.	Касаткіна І.В.							
Затвердив	Пересунько І.І.							

Допустимий короткочасний струм визначається часом вимкнення мережі, що складається з власне часу спрацьовування захисту t_1 , часу вимкнення комутаційного апарата t_2 і проміжку часу роботи асинхронних двигунів у генераторному режимі t_3 .

У разі приблизних розрахунків із похибкою в бік підвищення безпеки та застосування активно-ємнісного фільтра модель мережі може бути спрощена.

Достатньо розглядати тільки пошкоджений фідер і фільтр.

Доведемо це положення вираженням:

$$I_{нк} = \frac{\sum_{n=1}^{n-1} I}{\sum_{n=1}^n I} I_0$$

За наявності двох фідерів з узагальненими параметрами і фільтра може бути надано у вигляді:

$$I_{нк} = \frac{a + a_3 + j(b + b_3)}{a + a_3 + n + j(b + b_3 + m)} I_0, (4)$$

де a і b – активна і ємнісна провідність ізоляції суміжного фідера;

n і m – активна і ємнісна провідність ізоляції пошкодженого фідера;

.. a_3 і b_3 – активна і ємнісна провідність фільтра.

Дослідимо вплив провідності ізоляції пошкодженого фідера на величину струму нульової послідовності. Нас цікавить його абсолютне значення, тобто модуль правої частини залежності (4), що виражається комплексним числом. Для переходу до модуля обидві частини виразу (4) підводимо до квадрата і після перетворення отримуємо:

$$I_{H_0} = \frac{(a + a_3)^2 + (b + b_3)^2}{(a + a_3 + n)^2 + (b + b_3 + m)^2} I_0^2, (5)$$

Уведемо позначення:

$$\Delta = (a + a_3)^2 + (b + b_3)^2$$

тоді про диференціювавши отримаємо:

$$\frac{\partial I_{H_0}^2}{\partial m} = - \frac{2((a + a_3)^2 + (b + b_3)^2)I(b + b_3 + m)}{\Delta^2} I_0^2,$$

$$\frac{\partial I_{H_0}^2}{\partial n} = - \frac{2((a + a_3)^2 + (b + b_3)^2)I(b + b_3 + n)}{\Delta^2} I_0^2$$

За будь-яких значень:

$$\frac{\partial I_{H_0}^2}{\partial m} < 0, \frac{\partial I_{H_0}^2}{\partial n} < 0$$

Отже, при збільшенні m і n струму I_H зменшується. Мінімальне значення струм матиме за максимальної провідності ізоляції робочого фідера.

Визначаємо вплив суміжного фідера на струм нульової послідовності :

Для цього про диференціюємо вираз (5)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial I_H^2}{\partial a} \\ &= - \frac{2(a^2n + an^2 + am^2 + 2amb_3 + 2amb_3 + n^2a_3 + 2aa_3n)}{\Delta^2} I_0^2 \\ &+ \frac{2(a_3^2n + a_3m^2 + am^2 + 2bma_3 + 2ma_3b_3 - b^2n - 2nbb_3 - nb_3)}{\Delta^2} I_0^2 \\ \\ & \frac{\partial I_H^2}{\partial b} = - \frac{2(b^2n + 2anb + 2a_3nb + bm^2 + mb^2 + b_3n^2 + 2anb_3)}{\Delta^2} I_0^2 \\ &+ \frac{2(2a_3nb_3 + b_3m^2 + 2bb_3m + mb_3^2 - ma^2 - 2aa_3m - ma_3^2)}{\Delta^2} I_0^2 \end{aligned}$$

Многочлен, що виражає чисельник, відповідно до значення одночленів розіб'ємо на дві частини: додатну та від'ємну. Першу і другу частину для функції $\frac{\partial I_H^2}{\partial a}$опозначимо відповідно буквами А і В, для функції $\frac{\partial I_H^2}{\partial b}$ - буквами D і C:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_H^2}{\partial a} &> 0 \text{ за } A > B; & \frac{\partial I_H^2}{\partial a} < 0 \text{ за } A < B \\ \frac{\partial I_H^2}{\partial b} &> 0 \text{ за } D > C; & \frac{\partial I_H^2}{\partial b} < 0 \text{ за } D < C \end{aligned}$$

За будь-яких значень змінних $\Delta^2 > 0$. I_H мінімально при максимальних значеннях n і m.

A мінімальна за умови $a=0$;

B не залежить від a;

D мінімальна за умови $b=0$;

C не залежить від b

З огляду на це, для типових режимів зміни продуктивності ізоляції мережі визначаємо відповідність між a_3 і b_3 і за яких $\frac{\partial I_H^2}{\partial a} > 0, \frac{\partial I_H^2}{\partial b} > 0$:

$$\frac{\partial I_H^2}{\partial a} > 0 \text{ за умови } a_3$$

$$\begin{aligned} > \left[-\frac{n + \frac{m^2}{n} + 2\frac{mb}{n} + 2\frac{mb_3}{n}}{2} \right. \\ & \left. + \sqrt{\frac{\left(n + \frac{m^2}{n} + 2\frac{mb}{n} + 2\frac{mb_3}{n}\right)^2}{4} + (b + b_3)^2} \right] (6) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial I_H^2}{\partial b} > 0 \text{ за умови } b_3$$

$$> \left[-\frac{m + \frac{n^2}{m} + 2\frac{na}{m} + 2\frac{na_3}{m}}{2} + \sqrt{\frac{\left(m + \frac{n^2}{m} + 2\frac{na}{m} + 2\frac{na_3}{m}\right)^2}{4} + (a + a_3)^2} \right] \quad (7)$$

Використовуючи залежності (6) і (7), дослідимо монотонність зміни функції:

$$\frac{\partial I_{II}^2}{\partial a} > 0, \quad \frac{\partial I_{II}^2}{\partial b} > 0$$

Результати розрахунків зведено в таблицю:

Критерії монотонності функції дають співвідношення між a_3 і b_3 , за якого зміна a і b від нуля до граничних значень збільшує струм I_H . Не враховуючи суміжний фідер, ми тим самим занижуємо значення I_H , одержуване під час розрахунку, по співвідношенню до дійсної його величини. Це викликає зменшення струму однофазного витоку, що відключається, $I_0 < I_0$ і збільшення опору R , що відключається. Допустима кількісна похибка у визначенні величини струму I_H направлена в бік підвищення умов безпеки. Приймаючи $a=b=0$ розглядаємо найбільш несприятливий режим роботи захисту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Таблиця

max	max	b+m) max	a+n) max	Критерії монотонності збільшення функції $I_H = f(a, b)(\text{nim}) \max$
,222	,157	,314	,222	$\begin{cases} a_3 > -(0,276 + 0,7b_3) + \sqrt{0,1 + 0,7b_3 + 1,5b_3^2} \\ b_3 > -(0,233 + 1,47a_3) + \sqrt{0,054 + 0,65a_3 + 0,296a_3^2} \end{cases}$
,222	,088	,314	,222	$\begin{cases} a_3 > -(0,183 + 0,35b_3) + \sqrt{0,057 + 0,44b_3 + 1,12b_3^2} \\ b_3 > -(0,322 + 2,5a_3) + \sqrt{0,1 + 1,6a_3 + 7,256a_3^2} \end{cases}$
,167	,157	,314	,167	$\begin{cases} a_3 > -(0,3 + 0,95b_3) + \sqrt{0,12 + 0,89b_3 + 1,9b_3^2} \\ b_3 > (0,167 + 1,05a_3) + \sqrt{0,028 + 0,34a_3 + 2,1b_3^2} \end{cases}$
,167	,088	,314	,167	$\begin{cases} a_3 > -(0,22 + 0,5b_3) + \sqrt{0,1 + 0,67b_3 + 1,25b_3^2} \\ b_3 > -(0,24 + 1,9a_3) + \sqrt{0,06 + 0,925b_3 + 3,6a_3^2} \end{cases}$

У тих випадках, коли отримані в результаті розрахунку значення a_3, b_3 не відповідають критеріям (6) и (7), необхідно вважати, що провідність ізоляції всієї мережі зосереджена на робочому фідері.

Що активна провідність n_1 в ємнісна m_1 дорівнюють відповідно:

$$n_1 = n + a; m_1 = m + b$$

Уставку вибираємо використовуючи залежність

$$I_{\text{ну}}^2 = \frac{a_3^2 + b_3^2}{(a + a_3 + n)^2 + (b + b_3 + m)^2} I_0^2, (8)$$

яка отримана з виразу (5). Струм нульової послідовності за провідності ізоляції, розподіленої між двома фазами.

$$I_n^2 = \frac{(a + a_3)^2 + (b + b_3)^2}{(a + a_3 + n)^2 + (b + b_3 + m)^2} I_0^2, (9)$$

Порівнюючи вирази (8) і (9) показує що $I_{ny}^2 > I_n^2$ на всьому інтервалі існування функції аргументів a, b, a_3, b_3, m, n .

Отже, модель мережі, що складається з робочого фідера і фільтра, правомірна.

Помилка направлена в сторону підвищення безпеки.

У разі індуктивного фільтра щось спрямоване в бік збільшення розрахункового струму I_n порівняно з його дійсним значенням. Тому за індуктивно-активного фільтра електрична модель мережі не може бути спрощена.

Незалежно від характеру проведених досліджень, необхідно розглядати її як таку, що складається з фільтра і двох фідерів.

Доказ цього твердження провідності аналогічний викладеному:

$$= \frac{a + a_3 + j(b - b_3)}{a + a_3 + n + j(b - b_3 + m)} I_0, (10)$$

$$I_n^2 = \frac{a^2 + 2aa_3 + a_3^2 + (b - b_3)^2}{(a + a_3 + n)^2 + (b - b_3 + m)^2} I_0^2,$$

коли суміжний фідер відключений:

$$n_1 = n + a; m_1 = m + b$$

$$I_n^2 = \frac{a_3^2 + b_3^2}{(a + a_3 + n)^2 + (b - b_3 + m)^2} I_0^2 (11)$$

Знаменник вираження (10) і (11) дорівнюють між собою. У загальному випадку $b_3 > b$ и за малих значень a_3 , що характерно для індуктивних фільтрів.

$$I_{пв}^2 > I_{п}^2$$

Максимальне значення часу загасання ЕРС двигуна $t_3=0.5$ с (П 34).

При $t_1+t_2+t_3=0.7$ с допустимий струм $I_H = 200$ мА. Зменшення проміжку часу до 0,1-0,2 с дасть змогу збільшити допустимий короткочасний струм. Найпростіше цього можна досягти закороченням вимкненої мережі блок-контактами комутаційного апарату. У цьому випадку короткочасний струм завжди буде меншим за допустимий.

$$I_k < I_d$$

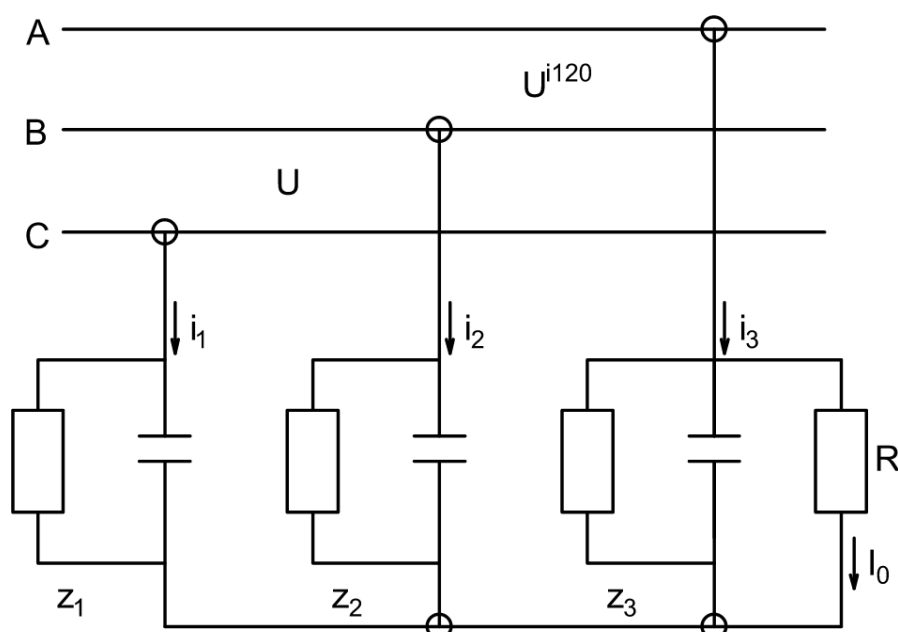
Мінімальний опір людини R при напрузі 220В не нижче 1000 Ом.

$$I_k = \frac{U_{нл}}{R} = \frac{220 \cdot 10^3}{1000} = 220 \text{ мА}$$

При $t=0,4$ с $I_d = 260 > 220$ мА

Визначимо величину ємності відключеного фідера, за якої необхідне замикання накоротко ділянки мережі, що захищається.

Розглянемо математичну модель витоку струму трифазної мережі:



Система рівнянь:

$$\begin{aligned} 1. i_1 + i_2 + i_3 + I_0 &= 0 \parallel 12. z_1 i_1 - z_2 i_2 = U \parallel 13. z_2 i_2 - z_3 i_3 \\ &= U e^{j120} \parallel 14. z_3 i_3 - R I_0 = 0 \end{aligned}$$

де $z_3 = \frac{r_3 x_{c3}}{x_{c3} + j r_3}$, z_1, z_2, z_3 – опір мережі.

звідки:

$$I_0 = - \frac{z_2 (1 - e^{j120}) + z_1 e^{j120}}{z_1 z_2 + R(z_1 + z_2) + R \frac{z_1 z_2}{z_3}}$$

При $z_1 = z_2 = z_3 = i$, $z_1 = z_2 = z_3$ (тобто $C_1 = C_2 = C_3$)

$$I_0 = -j \frac{\sqrt{3}U}{z + 3R}$$

Так як переважає ємнісна провідність, то можна прийняти

$z = -j \frac{1}{\omega C}$, і тоді

$$I_0 = -j \frac{\sqrt{3}U}{-j \frac{1}{\omega C} + 3R} \quad (12)$$

За ймовірності ураження людини 0,5% залежність може бути надана у вигляді виразу:

$$\int I_0^2 dt = 0,027$$

де I_0 – струм що протікає через людину, А

t – відповідні тому час, сек

Використовуючи вирази (12), визначаємо ємність мережі, у разі перевищення якої необхідне замикання накоротко фідера, відключеного селективним захистом,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C = \frac{10^6}{\sqrt{\left(\frac{U\sqrt{3}}{0.18}\right)^2 - (3.8)^2}} = \frac{10^6}{3.14 \sqrt{\left(\frac{380\sqrt{3}}{0.18}\right)^2 - 3000^2}} \geq \frac{1,5 \text{ мкФ}}{\text{фазу}}$$

Для розмикання силових контактів комутаційного апарату прийнято максимальне значення струму $I_0 = 220 \text{ мА}$

Дослідженнями визначено мінімальне значення I_H при $I_H = 220 \text{ мА}$ і опорі, що відключається $R = 7,5 \text{ мОм}$.

Аналіз отриманих даних показав, що за умови $I_0 \approx 160 - 220 \text{ мА}$ і мінімальне значення I_H может бути прийнято рівним 20 мА .

Потужність, що подається на вхід підсилювача, пропорційна струму нульової послідовності.

$$N = k \cdot z_0 I_{II}^2 (13)$$

де: $k = 0,5$ – коефіцієнт, що враховує узгодження опорів вторинної обмотки ТС і навантаження. z_0 – опір х.х. трансформатора струма, Ом;

$$z_0 = \frac{4,44 f S}{\pi D} \mu \cdot 10^{-8} \quad \text{– опір х.х. трансформатора струму, Ом}$$

де: f – частота мережі.

$\frac{B}{H} = \mu$ – магнітна проникність магнітопроводу, Гн/м

S – площа поперечного перерізу сердечника, м^2

D – середній діаметр магнітопроводу трансформатора, м.

B – максимальна індукція.

H – ефективне значення напруженості магнітного поля в осерді, а/м;

Внутрішній, отже, і середній діаметр осердя визначається перерізом кабелів, що застосовуються в розподільних мережах; Максимальний діаметр кабелю не перевищує 5 см .

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

З огляду на розміри кожуха трансформатора внутрішній діаметр магнітопроводу можна прийняти рівним 8 см, а середній діаметр - меншим або рівним 9 см.

Беручи сердечники трансформатора виробництва заводу "Мегоммер", які мають розміри

$D=8\text{см}$, $S=2\text{см}^2$, $\mu=\frac{B}{H}=20\,000$, і розуміємо, що $I_H=20\text{ мА}$, $k=0,5$, отримаємо:

$$N = 0,5 \cdot 20^2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4,44 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 20000}{8\pi} \cdot 10^{-8} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ см}$$

Для вибору площі перетину магнітопроводу представимо її у вигляді функції потужності сигналу на вході підсилювача. Використаємо вираз (13) і перетворимо його:

$$S = 260/N/, (\text{м}^2)$$

Захист відключає комутаційний апарат фідера – контактор або автомат.

Номінальна потужність котушок Р2 контактора і автоматичного вимикача, залежно від струму апарата, становить 200-600 В*А і зумовлює вибір виконавчого реле захист.

В умовах шахт за надійністю роботи добре зарекомендували себе реле РЕН-17, які й прийняті в апаратурі захисту. При послідовному з'єднанні його компонентів потужності відключення дорівнює $900\text{ва} \square P2$. Потужність, споживана котушкою реле Р2, не перевищує 0,5 Вт.

Для зменшення кількості елементів у схемі, а отже для збільшення надійності, підсилювач апаратури захисту прийнято однотактним. Коефіцієнт підсилення його визначається за потужністю входу та виходу:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_0 = k_1 k_2 = \frac{P_2}{N} = 2 \cdot 1,5 \frac{0,5}{7 \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot 10^6$$

$$k_0 = 2 \cdot 10^6, k_0 = 1,5 |N^{-1}|$$

де: $k_1 = 2$; $k_2 = 1,5$ – коефіцієнти, що враховують відповідно однотактність роботи схеми і зниження загального коефіцієнта посилення її, зумовлене введенням елементів температурної стабілізації.

Схема підсилювача низької частоти будується на транзисторних каскадах, з'єднаних між собою через ємнісний, трансформаторний або гальванічний зв'язок. Останній дає мінімальне спотворення фази сигналу, що підсилюється, порівняно з двома іншими, у зв'язку з чим і прийнятий в основу схеми підсилювача. Два підсилювальні каскади, зібрані за схемою загальним емітером, забезпечують отримання необхідного посилення потужності вхідного сигналу. Перший напівпровідниковий тріод (ПТ-1) підсилювач, працює в режимі малого сигналу, другий великого.

Коефіцієнт посилення другого каскаду.

$$i_2 = \frac{U_k}{U_{EB}} \beta = \frac{24}{0,25} 25 = 2400$$

де U_k – напруга на навантаженні при відкритому тріоді, В.

U_{EB} – напруга на електронах емітер-базис при струмі, що дорівнює уставці захисту, В.

β – коефіцієнт посилення за струмом. Для тріодів П25А $\beta_{min} = 25 \div 10$

Коефіцієнт підсилення першого каскаду:

$$\beta_1 = \frac{k_0}{i_2} = \frac{3,5 \cdot 10^6}{2400} \approx 1400$$

Як відомо, коефіцієнт посилення підсилювача максимальний під час вимкнення транзисторів за схемою зі спільним емітером і визначається залежностями:

$$k_0 = 0,9 \frac{E_{k1}}{2U_{\text{ЕС}}} \beta_{\text{мін}} \quad (14)$$

$$k_0 = 22 \frac{E_{k1}}{U_{\text{вх}}} \beta_{1\text{мін}} \beta_{2\text{мін}} \quad (15)$$

де E_{k1} E_{k2} – ЕРС джерел живлення колекторних кіл;

$\beta_{1\text{мін}}$ $\beta_{2\text{мін}}$ – коефіцієнти передачі струму транзисторами, відповідно до першого і другого каскадів підсилювача;

$U_{\text{вх}}$ $U_{\text{вх1}}$ – напруга, що подається на вхід транзисторів.

З виразу (15,14) випливає, що коефіцієнт посилення підсилювача максимальний за мінімального значення напруги $U_{\text{вх}}$.

Для визначення величини напруги $U_{\text{вх}}$ уявімо її у вигляді функції параметрів транзистора: гранично допустимої потужності P і опору переходу емітор-база-го

З цією метою виконаємо низку проміжних перетворень.

Потужність, розсіювання на емітер-колекторному переході транзистора,

$$P = (E_k - I_k R_n) I_k$$

де I_k , R_n – відповідно й опір навантаження колекторного кола.

Максимум функції:

$$P_{\text{max}} = \frac{E_k I_k}{2} \quad (16)$$

Опір z_0 залежить від струму бази транзистора I_6 . Співвідношення між ними з досить високою точністю апроксимується виразом:

$$z_0 = a_0 + \frac{a_1}{i_6} \quad (17)$$

Коефіцієнти полінома визначені методом найменших квадратів. ($a_0 = 85$, $a_1 = 0,195$).

Враховуючи, що в межах необхідної точності розрахунків: ...

$$i_6 = \frac{I_k}{\beta}, \quad U_{BX} = r_0 i_6 \quad (18)$$

і використовуючи вирази (16),(17) і (18), отримаємо

$$z_0 = 85 + \frac{0,195}{2P} \beta E_{k_1} \quad (19)$$

$$U_{BX1} = \sqrt{r_0 N} \quad (20)$$

Розв'язуючи спільно (11),(12),(13),(14),(18),(19) знаходимо:

$$S = \frac{3800}{E_{k_1}^2 \beta_{min_1}^2 \mu} + \frac{8,8}{2P \beta_{min_1} E_{k_1} \mu} \quad (21)$$

$$S = \frac{3800}{E_{k_2}^2 \beta_{min_1}^2 \beta_{min_2}^2 \mu} + \frac{8,8 E_{k_1}}{2P \beta_{min_1} \beta_{min_2}^2 E_{k_2}^2 \mu} \quad (22)$$

Використовуючи вирази (22) і (21), визначаємо перетин магнітопроводу залежно від кількості каскадів підсилювача і тип транзисторів. Розрахунок зводимо в таблицю.

Таблиця 1.

Залежність перетину магнітопроводу від кількості каскадів підсилювача і тип транзисторів

Підсилювач			Магнітопровід		
Кількість каскадів	Тип транзистора		перетин см^2	висота см	вага кг
	I го каскада	II го каскада			
1	МП-20	-	8300	4150	1800
1	МП-25Б	-	8300	4150	1800
1	МП-21 Д	-	5200	2800	1100
2	МП-20	МП-25Б	0.9	-	0,2
2	МП-21 Д	МП-25Б	0.4	-	0,1

Під час проведення чисельних розрахунків, параметри транзисторів обираються з технічної характеристики.

Магнітопровід виготовляється з легованого пермалору марки 80НХС або 79НМ, з початковою магнітною проникністю $\mu = 8\pi \cdot 10^{-3 \text{ ГН/м}}$

Аналіз даних, наведених у таблиці, показує, що за одно каскадного підсилювача розміри магнітопроводу явно не змінені (вага близько 2 тонн).

Тому підсилювач має бути 2х каскадним.

З огляду на це приймаємо:

1) Перший каскад підсилювача виконується на транзисторі МП-14А, другий МП-25Б

2) Перетин магнітопроводу $S=2\text{см}^2$

Подальший розрахунок підсилювача і вибір його елементів проводиться за загальноприйнятою методикою [Л1].

Число гвинтів вторинної обмотки ТТНП визначено експериментально за максимумом потужності, що передається, N і прийнято рівним 250, дріт ПЕЛШО, діаметр 0,5 мм. Вторинна обмотка з'єднується безпосередньо з входом підсилювача. Відсутність проміжних ланок між ТТНП і підсилювачем забезпечує найбільш повну передачу потужності корисного сигналу. Одночасно з цим спрощується виконання температурної стабілізації схеми захисту. Зміна коефіцієнта посилення тріодів компенсується відповідною зміною потужності, що подається на вхід підсилювача. Прийняте рішення в розглянутому випадку найефективніше і вигідно вирізняється своєю простотою.

Більш детально розглянемо оригінально виконану температурну стабілізацію схеми захисту, що відрізняється від прийнятих методів тим, що зміна коефіцієнта посилення тріодів компенсується відповідною зміною величини потужності, що подається на вхід підсилювача.

Співробітники НІГРІ експериментально досліджували схему підсилювача в камері штучного клімату і підтвердили високу експериментальність прийнятого рішення.

Вхідний опір напівпровідникового тріода обернено пропорційний величині струму. У схемі підсилювача зміщення в ланцюг бази тріода ПТ-1 подається з одного з плечей дільника напруги, виконаного на опорах R_4 , R_2 .

Під час регулювання величини опору R_2 змінюється струм у ланцюзі бази і його вхідний опір. Значення потужності, що подається на вхід підсилювача з ТТНП, залежить від величини вхідного опору тріода ПТ-1-г. Змінюючи значення останнього, регулюємо величину корисного сигналу зворотно пропорційною зміні коефіцієнта посилення тріодів. Виконується це автоматично. Застосовуємо в якості одного з елементів опору R_2 термістора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

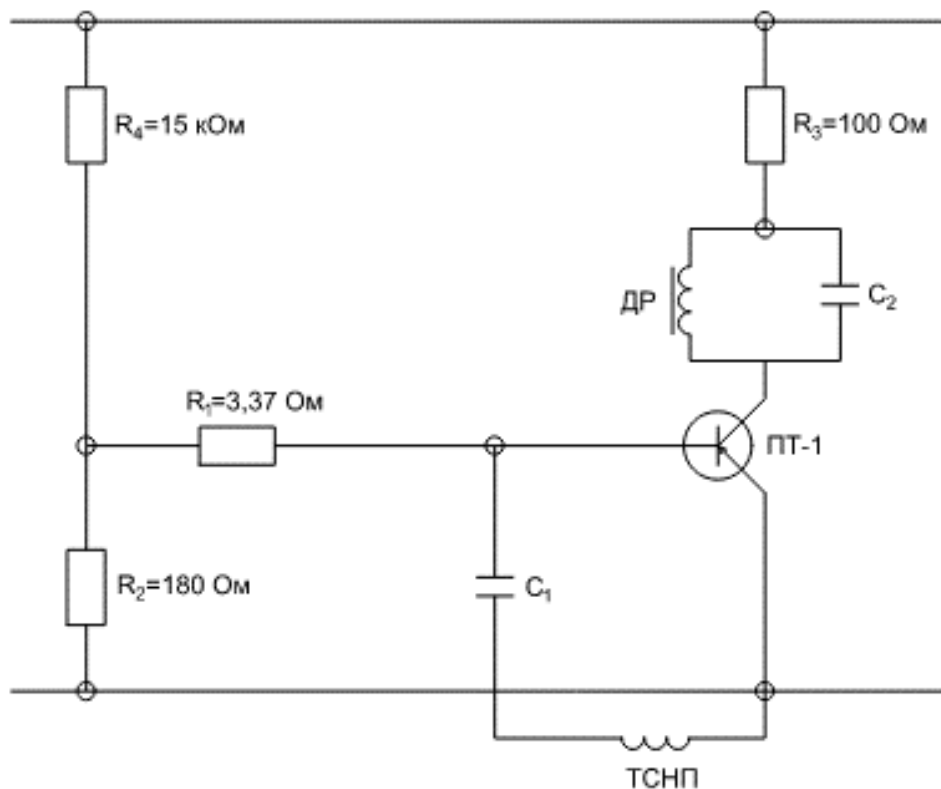


Рис. 2

Температурна стабілізація схеми підсилювача характеризується постійністю переданої потужності і виражається такою залежністю:

$$I_{20}\beta_{20} = I_t\beta_t(23)$$

Де I_{20} , I_t – змінний струм у ланцюзі бази триода ПТ-1 від джерела сигналу за температури навколишнього середовища відповідно 20°C і $t^\circ\text{C}$
 $10^\circ\text{C} \leq t \leq 35^\circ\text{C}$

β_{20} , β_t – коефіцієнт посилення за струмом підсилювача відповідно до температури навколишнього середовища 20°C и $t^\circ\text{C}$ $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$

β_1 , β_2 – коефіцієнти посилення за струмом триодів.

Межі зміни температури $t=10\div35^\circ\text{C}$ прийнято згідно з технічними умовами на апаратуру селективного захисту. Залежність величини робочого сигналу в ланцюзі бази триода ПТ-1 від опору R_1 за $t=20^\circ\text{C}$ визначено експериментально [Л37].

Максимальна подача потужності на вхід підсилювача відбувається при значенні $R_1 = 200 \div 2400$ Ом. Для мінімальної температури довкілля доцільно на кривій Рис.2. тому на ділянці, що забезпечує сталість переданої потужності під час зміни температури довкілля.

Опір емітер-бази триода ПТ-1-г - функція двох змінних (струмі бази I і температури навколишнього середовища t). Залежність $z = f(R_4, R_{\{2\}})$ для триода П-14, отримана експериментально співробітниками НІГРІ Рис.3.

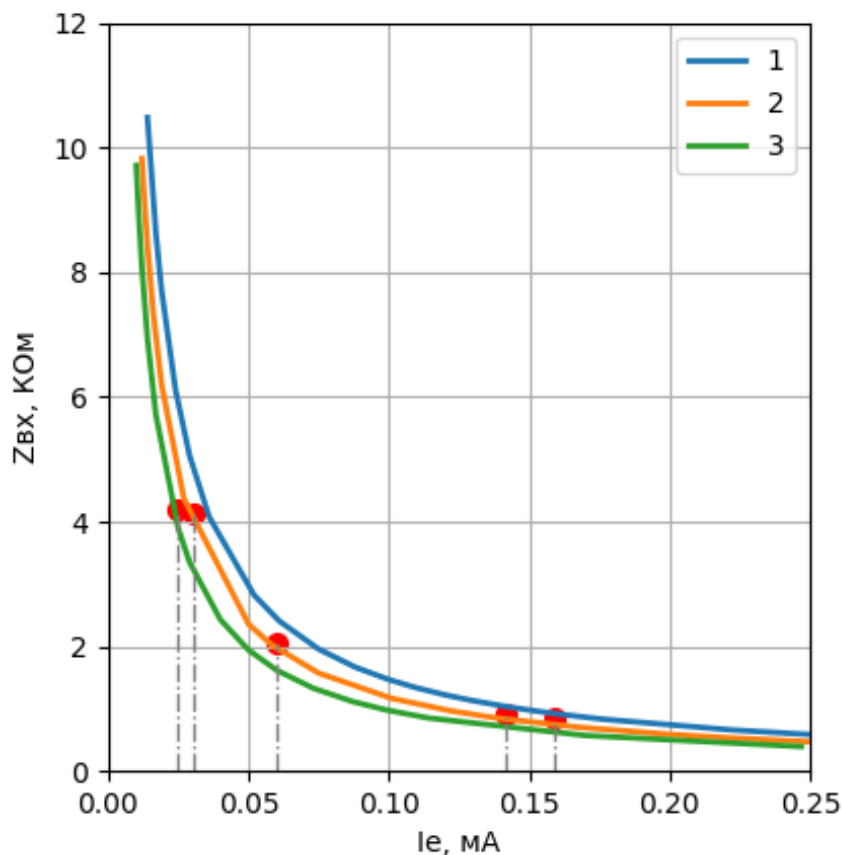


Рис. 3 – Залежність опору триода від струму його бази: 1 – 10 °С, 2 – 20 °С, 3 – 35 °С.

Складаючи ординати вольт-амперних характеристик опорів R_1, z , що відповідають температурі 20 °С, і розв'язуючи отримане рівняння разом із

залежністю $U_2 = f(R_4, R_{(2)})$, знаходимо струм зсуву в ланцюзі бази тріода ПТ-1:

$$U_2 = \frac{U}{R_4 + R_2} R_2 = \frac{3,2}{1500 + 1800} \cdot 180 \approx 0,34 \text{ В}$$

По рис.4, при $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $I=140\text{мА}$;

при $R_2 = 2,4 \text{ кОм}$, $I=70\text{мА}$;

при $R_3 = 4,7 \text{ кОм}$, $I=40\text{мА}$;

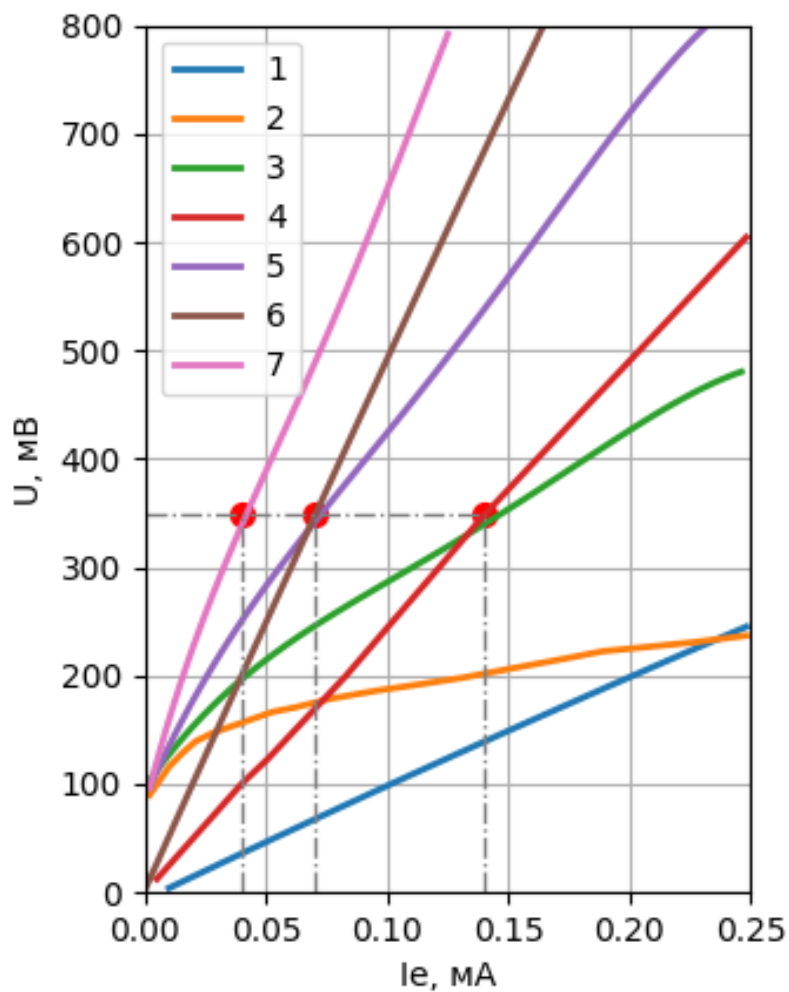


Рис. 4

Максимального значення переданої потужності прийняти координатами $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $I_{10}=40\text{мА}$;

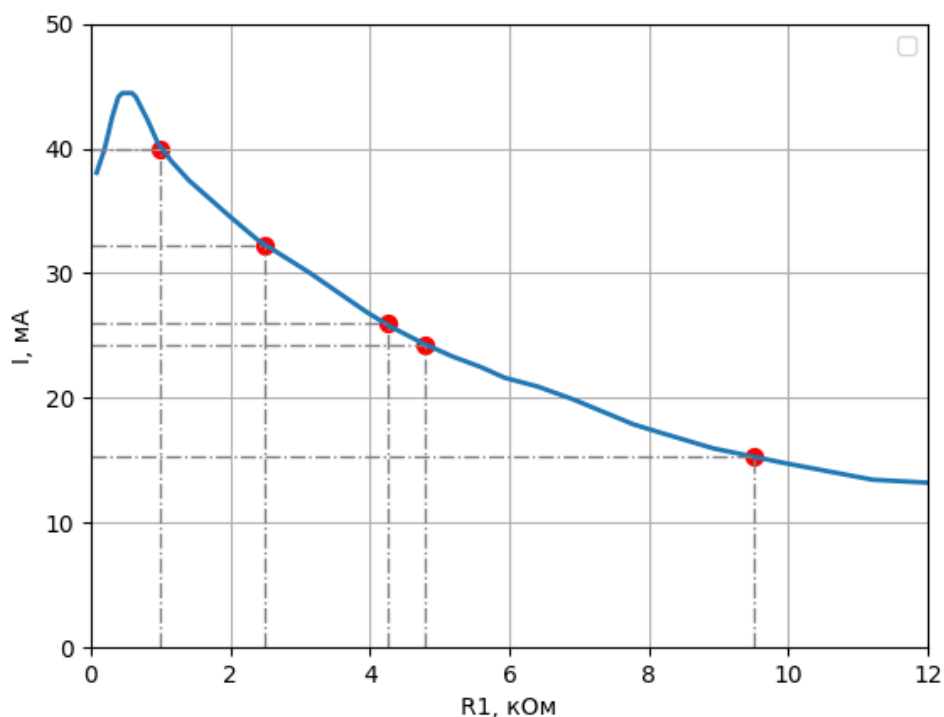


Рис. 5 Залежність працюючого струму в базі триода від опору в його ланцюзі R_1

З виразу (23) визначаємо струм у базі тріода при температурі $t_1 = 20$ і $t_2 = 35$:

$$I_{20} = \frac{I_{10}\beta_{10}}{\beta_{20}} = \frac{I_{10}\beta_{110}\beta_{210}}{\beta_{120}\beta_{220}} = \frac{40 \cdot 20 \cdot 22,5}{22 \cdot 25} = 32,4 \text{ мА}$$

$$I_{35} = \frac{I_{10}\beta_{110}\beta_{210}}{\beta_{135}\beta_{235}} = \frac{40 \cdot 20 \cdot 22,5}{25,3 \cdot 30} = 23,4 \text{ мА}$$

Цим значенням струму за кривою на рис.5. відповідає опір R_1 , що дорівнює 2,4 і 4,7 кОм.

Подальший хід розрахунку полягає у визначенні вхідного опору підсилювача за значень робочого сигналу, що нас цікавлять. Використовуючи останнє, за допомогою графічного розв'язання системи рівнянь знаходимо напругу на опорі R_2 , рис. 4. Визначення струмів зміщення першого каскаду підсилювача:

- 1- вольт-амперна характеристика опору емітер-базис триода П-14 при $t = 20^{\circ}\text{C}$;
- 2- $R_1 = 1 \text{ кОм}$;
- 3- вольт-амперна характеристика ланцюга, що складається з послідовно з'єднаних опорів R_1 і емітер-базис триода з при $R_1 = 1 \text{ кОм}$
- 4- $R_1 = 2,4 \text{ пОм}$;
- 5- при $R_1 = 2,4 \text{ кОм}$;
- 6- $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$;
- 7- при $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$

Для цих точок графічним споживанням (див. рис. 3) визначаємо еквівалентні значення струмів зміщення при температурі навколишнього середовища $10^{\circ}, 20^{\circ}, 35^{\circ}\text{C}$.

$$I_{10} = 156 \text{ мА}; I_{20} = 70 \text{ мА}; I_{35} = 31 \text{ мА}$$

По струму $I_{20} = 70 \text{ мА}$ і напруги зміщення $U_2 = 0,34 \text{ В}$, використовуючи залежність $U_2 = f(I_{20})$, знаходимо значення опору $R_1 = 2,4 \text{ кОм}$ (див.рис.4. точка А), встановлюваного під час температурної стабілізації схеми підсилювача.

Через початок координат (рис.5.) проводимо пряму 4:

$$U = IR_1 = 2.41$$

і будуємо вольт-амперні характеристики опору z - емітер-базис триода ПТ-1 для температури 10°C (крива 7), температури 20°C (крива 6) і температури 35°C (крива 5).

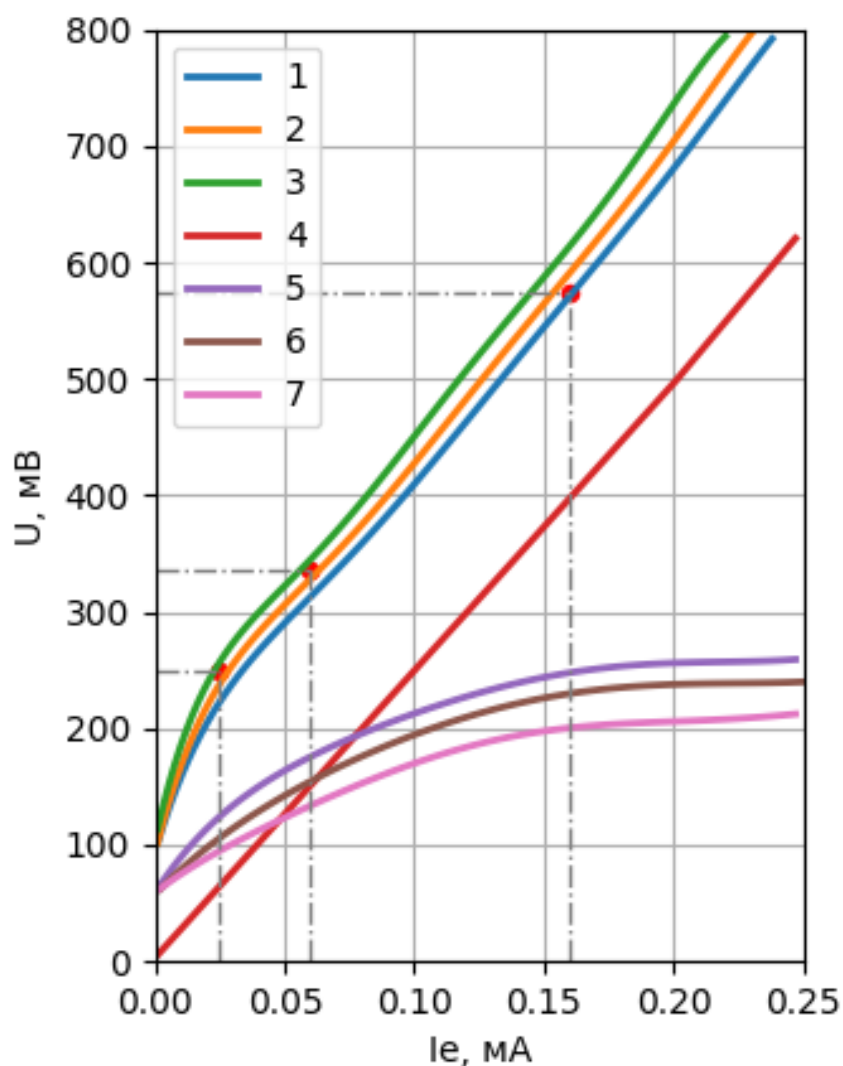


Рис. 6

Залежність 2 (див.рис.6). $U_{20} = f(z, I)$, отримана експериментально, а залежність 3 – $U_{10} = f(z, I)$. і крива 1- $U_{35} = f(z, I)$ визначені розрахунковим шляхом за формулою:

$$U_{tz} = U_{t1} + k_u \Delta t$$

де U_t – напруга, прикладена до електродів тріода емітер-база за температури навколишнього середовища $t^\circ\text{C}$;

k_u – коефіцієнт, для германієвих транзисторів дорівнює $1.9 \div 2.5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

Складаючи ординати прямої $U = IR_1$ з ординатами залежностей

$$U_{10} = f(I), U_{20} = f(I), U_{35} = f(I),$$

Знаходимо форму кривих напруги на плечі дільника R_2 , що забезпечують температурну стабілізацію схеми (див. рис.5).1

Величина напруги дорівнює ординатам точок перетину відповідно кривих 3,2,1 і прямих $I = 31\text{мА}, I = 70\text{мА}, I = 156\text{мА} \dots$ (точка А,В,С).

Напруга зміщення для температури 10°C $U = 562\text{ мВ}$, для 20°C $U = 340\text{ мВ}$ для 35°C $U = 249\text{ мВ}$. Щоб отримати ці значення, необхідно змінити величину опору R_2 таким чином:

$$\text{при } t = 10^\circ\text{C} \quad R_2 = \frac{U_3 \cdot R_7}{U - U_2} = \frac{562 \cdot 1500}{3200 - 562} = 320 \text{ Ом}$$

$$\text{при } t = 35^\circ\text{C} \quad R_2 = \frac{249 \cdot 1500}{3200 - 249} = 126 \text{ Ом}$$

Значення R_2 для проміжних температур визначено аналогічно:

$$\text{при } t = 15^\circ\text{C } R=230 \text{ Ом; при } t = 20^\circ\text{C } R=180 \text{ Ом;}$$

$$\text{при } t = 25^\circ\text{C } R=155 \text{ Ом; при } t = 30^\circ\text{C } R=146 \text{ Ом;}$$

Необхідну характеристику опору плеча дільника опору R_2 , отримуємо, приймаючи змішане з'єднання опорів (рис. 7.), один з яких термозалежний термістор типу ММТ-12, що має характеристику, наведену на рис. 8.

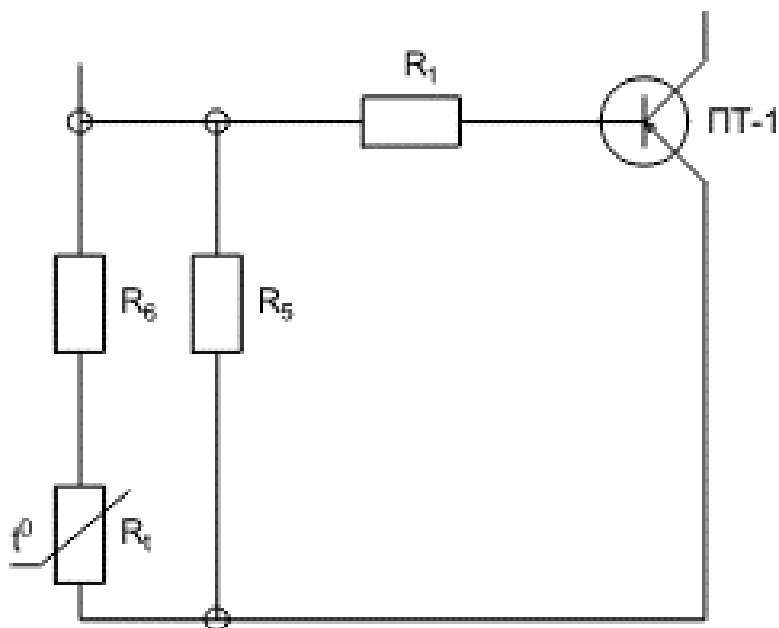


Рис. 7 Схема включення термістора R_t

Опори R_5 , R_6 (див.рис.7) знаходимо, вирішуючи систему рівнянь, складену для крайніх меж зміни температури 10 і 35°C

$$\frac{(R_6 + R_{t_{35}})R_5}{R_6 + R_5 + R_{t_{35}}} = 126 \text{ Ом}; \quad R_5 = 1940 \text{ Ом};$$

$$\frac{(R_6 + R_{t_{10}})R_5}{R_6 + R_5 + R_{t_{10}}} = 320 \text{ Ом}; \quad R_6 = 53 \text{ Ом};$$

Величину опору термістора ММТ-12 приймають за характеристикою його (див. рис. 8):

$$\text{при } t = 10^\circ\text{C} \quad R_{t_{10}} = 330 \text{ Ом}$$

$$\text{при } t = 35^\circ\text{C} \quad R_{t_{35}} = 82 \text{ Ом}$$

Для проміжних температур

$$\text{при } R_5 = 1950 \text{ Ом и } R_6 = 53 \text{ Ом при } t = 15^\circ\text{C}$$

$$\text{и } R_2 = 266 \text{ Ом; -при } 20^\circ\text{C} \quad R_2 = 180 \text{ Ом};$$

$$\text{при } t_2 = 25 \quad R_2 = 170 \text{ Ом};$$

при $t = 30^{\circ}\text{C}$ $R_2 = 159\ \text{Ом}$;

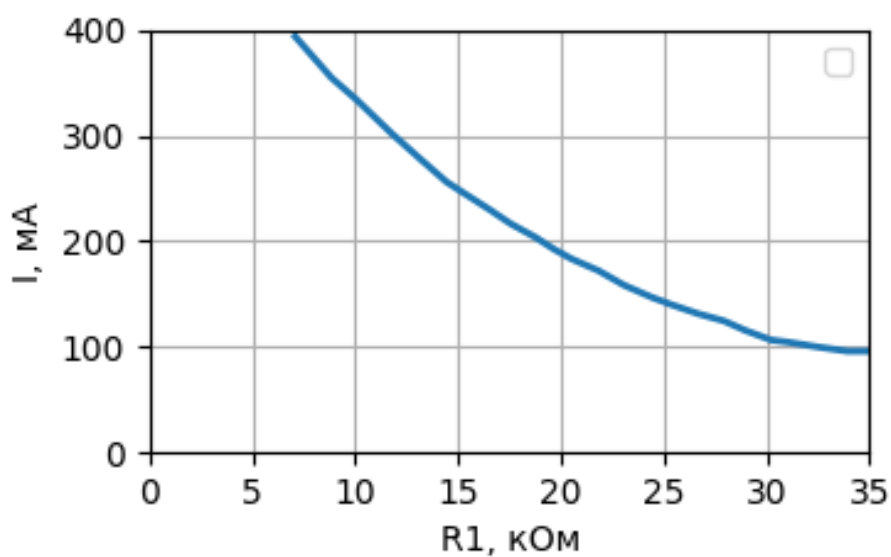


Рис. 8 – температурна характеристика термістора ММТ-12 (отримана експериментально)

Експериментальна перевірка роботи схеми підсилювача, параметри якого прийнято відповідно до розрахунку, показала, що уставці захисту під час зміни температури навколишнього середовища відхиляється від номінального значення не більше ніж на $\pm 10\%$.

Висновки

Запропонована методика визначення електричних параметрів підсилювача та магнітопроводу трансформатора струму нульової послідовності та складового елементу комплексу пристрою реле, захисту гірників від враження струмом в умовах підземних робіт. Система електропостачання підземного підприємства з видобутку залізної руди є критично важливою складовою безперебійної та безпечної роботи усіх виробничих процесів. Вона забезпечує живлення основного та допоміжного обладнання, систем вентиляції, водовідливу, транспорту і зв'язку. Електроенергія надходить із зовнішньої мережі та через багаторівневу систему трансформаторних підстанцій і розподільчих пристроїв подається до споживачів у підземній частині. Особливості експлуатації в умовах шахти зумовлюють застосування вибухозахищеного обладнання, систем захисту від аварій та резервного живлення. Ефективне функціонування цієї системи залежить від її технічного стану, рівня автоматизації та енергоефективності. У контексті реалізації Енергетичної стратегії України до 2035 року особливе значення набувають заходи з модернізації електросистем, зменшення енергоємності виробництва та впровадження сучасних цифрових технологій. Це сприяє підвищенню безпеки, енергетичної незалежності та конкурентоспроможності підприємств гірничої галузі.

Модернізація електросистем у гірничій промисловості є важливою складовою стратегії сталого розвитку, оскільки дозволяє значно знизити витрати на енергію та зменшити вплив на навколишнє середовище. Впровадження новітніх цифрових технологій дозволяє здійснювати моніторинг і контроль за станом електричних мереж в реальному часі, що підвищує оперативність реагування на можливі аварії та несправності. Завдяки автоматизованим системам управління, підприємства можуть зменшити ризик помилок, а також знижувати експлуатаційні витрати.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливою складовою є також забезпечення безперервності електропостачання через наявність резервних джерел енергії, що особливо критично для підземних об'єктів, де відмови в електропостачанні можуть призвести до серйозних наслідків. Залучення енергоефективних технологій, таких як використання багаторівневих трансформаторних підстанцій з низькими втратами, також дає можливість значно знизити енергоспоживання в умовах шахти. Інвестиції в модернізацію електричних мереж в поєднанні з дотриманням норм вибухозахисту можуть суттєво підвищити рівень безпеки працівників та запобігти виникненню надзвичайних ситуацій. Адаптація енергетичних систем до сучасних вимог підвищує не лише ефективність виробничих процесів, але й здатність підприємств адаптуватися до змінюваних умов енергетичного ринку та вимог екологічної безпеки. Крім того, це сприяє розвитку інноваційних рішень у гірничій промисловості, що відповідають вимогам міжнародних стандартів. Враховуючи ці фактори, інвестиції в енергетичну модернізацію є стратегічно важливими для забезпечення довгострокової стабільності та конкурентоспроможності підприємств гірничої галузі на міжнародному ринку.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність." Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p>

2. Стогній, Б. С. та ін. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011.

3. Шиловський, А. К. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття, за редакцією А. К. Шидловського та М. П. Ковалка, Київ: УЕЗ, 2001.

4. Денисюк, С., Таргонський, В. "Енергоефективність України: проблеми та шляхи її зростання." Енергетика: економіка, технології, екологія. Загальні проблеми енергоефективності, № 4, 2017, сс. 7-28.

5. Денисюк, С. П. та ін. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016.

6. Денисюк, С. та ін. "Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання." Енергетика: економіка, технології, екологія, №2(52), 2018, сс. 7-19.

7. Сінчук, І. О. та ін. Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2016.

8. Синчук, О. Н. и др. Потенциал электроэнергетической эффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2015.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Дремин, А. А. "Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд." Горный журнал, № 12, 2006, сс. 45-47.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-08	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		