

MA-5753

621.31
E 50

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Електрична частина конденсаційної електростанції потужністю 2320
МВт з дослідженням методів діагностики головної ізоляції силових
трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕС-22мз
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка з
освітня програма «Електричні станції»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Качалка М.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС

Собчук Н. В.

(прізвище та ініціали)

« 07 » 06 2024 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ЕСЕЕМ

Войтюк Ю.П.

(прізвище та ініціали)

« 07 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., проф. Комар В. О.

(прізвище та ініціали)

« 07 » 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О

2024 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Качалка Микола Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Електрична частина конденсаційної електростанції потужністю 2320 МВт з дослідженням методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів

керівник роботи к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Собчук Н. В.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 81

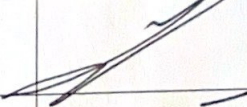
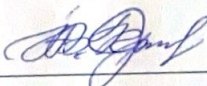
2. Строк подання студентом роботи 28 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів. Тип палива – вугілля; генератори – 2320 МВт (2x160+4x500); максимальне навантаження місцевого району 250 МВт; напруга мережі району 220 кВ; максимальна потужність, що віддається в систему 1600 МВ; відстань до місця приєднання до енергосистеми 780 км.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Електротехнічна частина. 2. Дослідження методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів. 3. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 4. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Графіки електричних навантажень станції. 2. Схеми ВРУ 220 кВ та 500кВ. 3. Схема власних потреб станції. 4. Головна ізоляція силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Собчук Н. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О. В. д. пед. н., професор каф. БЖДПБ		
Економічна частина	Остра Н. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		

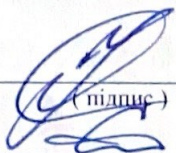
7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		Пр- міся
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	16.01.24	18.01.24	
2	Техніко-економічне обґрунтування проектування КЕС	19.01.24	08.02.24	
3	Електротехнічна частина	09.02.24	22.02.24	
4	Дослідження методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів	23.02.24	27.02.24	
5	Економічна частина	28.02.24	05.03.24	
6	Оформлення пояснювальної записки	06.03.24	17.04.24	
7	Виконання графічної/ілюстративної частини та оформлення презентації	19.04.24	30.04.24	
8	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР	22.05.24	24.05.24	
9	Рецензування МКР	25.05.24	01.06.24	
10	Захист МКР	За графіком		

Студент

Керівник роботи


(підпис)

М.М. Качалка

Н. В. Собчук

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
ANNOTATION	7
ВСТУП.....	8
1 ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА.....	11
1.1 Розрахунок графіків електричних навантажень	11
1.2 Вибір основного обладнання	17
1.3 Вибір структурної схеми станції	19
1.4 Вибір схем ВРУ-500 та 220 кВ	24
1.5 Вибір схеми власних потреб	25
1.6 Розрахунок струмів короткого замикання	26
1.7 Визначення максимальних струмів приєднань та імпульсів квадратичного струму.....	41
1.8 Вибір комутаційної апаратури	44
1.9 Вибір струмоведучих частин	45
1.10 Вибір вимірювальних трансформаторів	51
1.11 Вибір акумуляторної батареї	53
1.12 Вибір засобів обмеження перенапруг, високочастотних загороджувачів та шунтових реакторів	56
1.13 Розрахунок грозозахисту ВРУ-500 кВ	56
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ.....	Error! Bookmark not defined.
2.1 Поняття про частковий розряд	60
2.2 Основні характеристики часткових розрядів	65
2.3 Часткові розряди при змінній напрузі.....	72
2.4 Діелектричні втрати при наявності часткових розрядів	78
2.5 Залежність напруженості часткових розрядів від товщини діелектрика.....	80
2.6 Основні процеси руйнування ізоляції частковими розрядами	87
2.7 Характеристики часткових розрядів, що визначає руйнування ізоляційних матеріалів.	93

2.8 Енергетичні характеристики руйнування ізоляційних матеріалів	94
2.9 Вплив температури на електричне старіння ізоляції	96
2.10 Визначення допустимих напруг	97
2.11 Основні види часткових розрядів в силових трансформаторах.	100
2.12 Руйнування масло-бар'єрної ізоляції часткових розрядів	104
2.13 Тривала міцність масло-бар'єрної ізоляції і допустимі напруженості	107
2.14 Дослідження газів в маслі на основі пристрою HYDROCAL	110
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	112
3.1 Техніко-економічне порівняння двох структурних схем	112
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	118
4.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації об'єкта	
4.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць ...	Error! Bookmark not defined.
4.1.2 Електробезпека	Error! Bookmark not defined.
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	
4.2.1 Мікроклімат	
4.2.2. Склад повітря робочої зони	
4.2.3 Виробниче освітлення	
4.2.4 Виробничий шум	
4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Радіаційний захист	
4.3.1 Дія радіації на людину	
ВИСНОВКИ	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	137
ДОДАТКИ	136

АНОТАЦІЯ

Качалка Микола Миколайович «Електрична частина конденсаційної електростанції потужністю 2320 МВт з дослідженням методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів». Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. 2019.– 132 с. Бібліогр.: 25. Іл.: 34. Табл.: 28.

Розглянуто конструктивні особливості електричної частини конденсаційної електростанції та методи діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів. Виконано розрахунок економічної доцільності вибору схеми ВРУ-500 кВ. Досліджено причини старіння ізоляції та чинники, що впливають на його швидкість. Проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які впливають на персонал, що працює з високовольтним обладнанням. Також виконано розрахунок заземлення на площадці ВРУ.

Ключові слова: електростанція, конденсаційна електростанція (КЕС), турбогенератор, трансформатор, відкрита розподільча установка (ВРУ), частковий розряд, діелектрик, масло-бар'єрна ізоляція, руйнування ізоляції, старіння ізоляції, високовольтне обладнання.

ANNOTATION

Kachalka Mikola Mikolaivich "Electric capacitors of the condenser electrostation 2320 MW for the purpose of determining the head voltage of the power plant transformers with characteristics of particle rostratus». The master of the robot is a qualified technician. – Vinnitsa: VNTU. 2019.– 132 c. Library: 25. Volume: 34. Table: 28.

The structural integrity of the electrical components of the condenser electrostations and the methods of head magnetism of the isolators are clearly evident. power transformers with the characteristics of particle generators. The vicon pink color of the economical vibrating wheel VRU-500 kW. The oldest medicine practitioners in the world, Chinnicky, are said to be addicted to yoga. It is analyzed by indirect and selective factors, as if to inject into the person, as directed by highly qualified personnel. Such a wonderful rose garden on the square in the URU.

Key words: electrostation, condenser electrostation (KS), turbogenerator, transformer, rotary potentiometer (RTU), rotary potentiometer, electrician, oil-barreled isolat, the isolat, the old isolat, the visocal islamic.

ВСТУП

Актуальність теми. Найбільша частка виробленої електроенергії в світі припадає на теплові електростанції (ТЕС) – 60%, які використовують традиційні види палива: вугілля, газ, мазут. Конденсаційними електричними станціями (КЕС) називаються особливий вид ТЕС, які призначені виключно для виробництва електроенергії. Головною особливістю КЕС є те, що в них забезпечуються умови максимально повного перетворення енергії пари, виробленої у котлі, шляхом максимально можливого розширення її у робочих циліндрах турбіни у механічну енергію обертання ротора-турбогенератора, а потім в електричну енергію.

Стратегічною метою розвитку електроенергетичного комплексу є його докорінна перебудова на засадах новітніх технологій із забезпеченням маневреності, енергетичної та економічної ефективності, екологічної прийнятності, зовнішньої конкурентоспроможності та ринкових умов функціонування, що забезпечить стале, надійне, безпечне, якісне постачання енергії галузям економіки і соціальної сфери країни.

Більшість основного обладнання електричних станцій в Україні відпрацювала свій термін роботи. 96 % обладнання ТЕС відпрацювало свій проектний ресурс, 73 % – перевищило граничний. Практично всі АЕС України повністю відпрацюють свій розрахунковий ресурс до 2026 року.

Проектування електростанції досить складний і масштабний процес. При проектуванні електричної частини станції розробляється техніко-економічне обґрунтування, проводиться вибір структурної технологічної схеми і основного обладнання, розрахунок капіталовкладення, аналіз заходів охорони праці.

При експлуатації маслонаповненого обладнання, необхідно проводити періодичні діагностування, для забезпечення нормальної роботи. Для цього використовують різні методи діагностування маслонаповненого обладнання.

Під дією високої напруженості електричного поля в ізоляції в місцях зниженою електричної міцності виникають часткові розряди, які представляють собою пробої газових включень, локальні пробої малих обсягів твердого або рідкого діелектрика, місцеві розряди по поверхні твердого діелектрика. Умови виникнення часткових розрядів визначаються конфігурацією електричного поля ізоляційної конструкції і електрофізичними характеристиками (в тому числі електричної міцністю) розглянутої області ізоляції.

Надійна робота ізоляції високовольтних конструкцій може бути забезпечена при дотриманні наступних умов:

1. Ізоляція повинна витримувати з достатньою для практики надійністю можливі в експлуатації перенапруги з урахуванням наявних захисних заходів, статистичного характеру впливають перенапруг і електричної міцності ізоляції, а також кумулятивних процесів, пов'язаних з частковим пошкодженням ізоляції при впливі перенапруги.

2. Ізоляція повинна з достатньою для практики надійністю витримувати тривалий час (протягом всього терміну експлуатації) впливає робоча напруга з урахуванням можливих його змін в допустимих межах.

Мета: метою даної дипломної роботи є проектування електричної частини КЕС та дослідження методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів.

Задача дипломної роботи: Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані такі основні завдання:

- проведено розрахунок графіків електричних навантажень;
- складено структурні та технологічні схеми станції;
- вибір основного обладнання;
- розрахунок заземлення;
- проаналізовано основні характеристики часткових розрядів;
- проаналізовано характеристики часткових розрядів при змінній напрузі;

- визначенно допустимі напруги, які впливають на стан ізоляції;
- розв'язані питання забезпечення безпеки праці персоналу, що обслуговує обладнання.

Об'єктом дослідження є силові трансформатори на конденсаційній електричній станції, а **предмет дослідження** - впливи часткових розрядів на стан ізоляції в силових трансформаторах.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, техніко-економічного обґрунтування, вибір структурної та технологічної схеми, вибір основного обладнання, розрахунку струмів к.з., розрахунку заземлення, руйнування ізоляції частковими розрядами. Висновки. Список використаної літератури. Основний зміст викладений на 133 сторінках друкованого тексту, містить 34 рисунок, 28 таблиць. Загальний обсяг магістерської роботи 162 сторінки.

1 ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА

Розрахунок графіків електричних навантажень

Режими роботи електричної станції задаються графіками електричних навантажень району, який обслуговується. Їх потужність повинна забезпечити покриття графіків навантажень з урахуванням втрат потужності на передачу та витрат на власні потреби станції.

При розрахунку графіків навантажень відносну величину постійних та змінних втрат приймаємо:

- в мережах району: $\Delta P'_{1*} = 0,01$; $\Delta P'_{2*} = 0,06$;

- в мережах системи: $\Delta P''_{1*} = 0,02$; $P''_{2*} = 0,14$.

Приведемо приклад розрахунку графіків навантажень для інтервалу часу “0÷5” і пори року “зима”. Для всіх часових інтервалів і для всіх пір року розрахунки проводяться аналогічно. Всі розрахункові дані зводимо в таблицю 1.1.

Постійні втрати в мережах місцевого району та системи:

$$\Delta P_{1p} = \Delta P'_1 \cdot P_{p_{\max}}; \quad (1.1)$$

$$\Delta P_{1c} = \Delta P''_1 \cdot P_{c_{\max}}; \quad (1.2)$$

$$\Delta P_{1p} = 0,01 \cdot 250 = 2,5 (\text{МВт});$$

$$\Delta P_{1c} = 0,02 \cdot 1600 = 32 (\text{МВт}).$$

Змінні втрати в мережах місцевого району:

$$\Delta P_{2p} = \Delta P'_2 \cdot \frac{P_{p_{0 \div 6}}^2}{P_{p_{\max}}}, \quad (1.3)$$

$$\Delta P_{2p} = 0,06 \cdot \frac{200^2}{250} = 9,6 (\text{МВт}).$$

Таблиця 1.1 – Дані для побудови графіків електричних навантажень

Години доби, год.		0-5	5-9	9-12	12-15	15-18	18-22	22-23	23-24
Навантаження місцевого району, %	зима	80	82	93	93	82	100	90	80
	літо	75	77	87	87	78	95	85	75
Навантаження місцевого району, МВт	зима	200	205	232,5	232,5	205	250	225	200
	літо	187,5	192,5	217,5	217,5	195	237,5	212,5	187,5
Постійні втрати потужності в мережах місцевого району, МВт	зима	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	літо	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Змінні втрати потужності в мережах місцевого району, МВт	зима	9,60	10,09	12,97	12,97	10,09	15,00	12,15	9,60
	літо	8,44	8,89	11,35	11,35	9,13	13,54	10,84	8,44
Потужність, що віддається в місцевий район, МВт	зима	212,10	217,59	247,97	247,97	217,59	267,50	239,65	212,10
	літо	198,44	203,89	231,35	231,35	206,63	253,54	225,84	198,44
Навантаження системи, %	зима	60	75	100	85	75	100	80	65
	літо	55	70	95	80	70	95	75	60
Навантаження системи, МВт	зима	960	1200	1600	1360	1200	1600	1280	1040
	літо	880	1120	1520	1280	1120	1520	1200	960
Постійні втрати потужності в мережах системи, МВт	зима	32	32	32	32	32	32	32	32
	літо	32	32	32	32	32	32	32	32
Змінні втрати потужності в мережах системи, МВт	зима	80,64	126,00	224,00	161,84	126,00	224,00	143,36	94,64
	літо	67,76	109,76	202,16	143,36	109,76	202,16	126,00	80,64
Потужність, що віддається в систему, МВт	зима	1072,64	1358,00	1856,00	1553,84	1358,00	1856,00	1455,36	1166,64
	літо	979,76	1261,76	1754,16	1455,36	1261,76	1754,16	1358,00	1072,64
Сумарна потужність, що віддається з шин станції МВт	зима	1284,74	1575,59	2103,97	1801,81	1575,59	2123,50	1695,01	1378,74
	літо	1178,20	1465,65	1985,51	1686,71	1468,39	2007,70	1583,84	1271,08
Витрата на власні потреби, МВт	зима	93,30	102,88	120,29	110,34	102,88	120,94	106,82	96,39
	літо	89,79	99,26	116,39	106,54	99,35	117,12	103,15	92,85
Потужність, яка виробляється генераторами ЕС, МВт	зима	1378,04	1678,47	2224,27	1912,15	1678,47	2244,44	1801,83	1475,13
	літо	1267,98	1564,91	2101,90	1793,26	1567,73	2124,82	1686,99	1363,92

Змінні втрати в мережах системи:

$$\Delta P_{2c} = \Delta P_2'' \cdot \frac{P_{c0 \div 6}^2}{P_{cmax}}, \quad (1.4)$$

$$\Delta P_{2c} = 0,14 \cdot \frac{960^2}{1600} = 80,64 \text{ (МВт)}.$$

Сумарна потужність, яка віддається у місцевий район:

$$P_{рвід} = P_{p0 \div 6} + \Delta P_{1p} + \Delta P_{2p0 \div 6}, \quad (1.5)$$

$$P_{\text{рвід}} = 200 + 2,5 + 9,6 = 212,1 \text{ (МВт)}.$$

Сумарна потужність, яка віддається у систему:

$$\begin{aligned} P_{\text{свід}} &= P_{\text{с0÷6}} + \Delta P_{1\text{с}} + \Delta P_{2\text{с0÷6}}, \\ P_{\text{свід}} &= 960 + 32 + 80,64 = 1072,64 \text{ (МВт)}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Сумарна потужність, що віддається з шин:

$$\begin{aligned} P_{\text{від0÷6}} &= P_{\text{рвід}} + P_{\text{свід}}, \\ P_{\text{від0÷5}} &= 212,1 + 1072,64 = 1284,74 \text{ (МВт)}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Потужність, що віддається на власні потреби станції:

$$\begin{aligned} P_{\text{вп}}^{0÷5} &= \left(0,4 + 0,6 \frac{P_{\text{від}}^{0÷5}}{P_{\text{вст}}} \right) \frac{P'_{\text{вп}} \cdot P_{\text{від max}}}{100}, \\ P_{\text{вп}}^{0÷5} &= \left(0,4 + 0,6 \frac{1284,74}{2320} \right) \frac{6 \cdot 2123,5}{100} = 93,3 \text{ (МВт)}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Потужність, що виробляється генераторами:

$$\begin{aligned} P_{\text{вир}} &= P_{\text{від}} + P_{\text{вп}}, \\ P_{\text{вир}} &= 1284,74 + 93,3 = 1378,04 \text{ (МВт)}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

За даними таблиці 1.1 будуюмо наступні графіки $P = f(t)$: графік потужності, що віддається в місцевий район (рисунок 1.1); графік потужності, що віддається в систему (рисунок 1.2); графік потужності, що виробляється генераторами (рисунок 1.3); річний графік за тривалістю навантаження (рисунок 1.4).

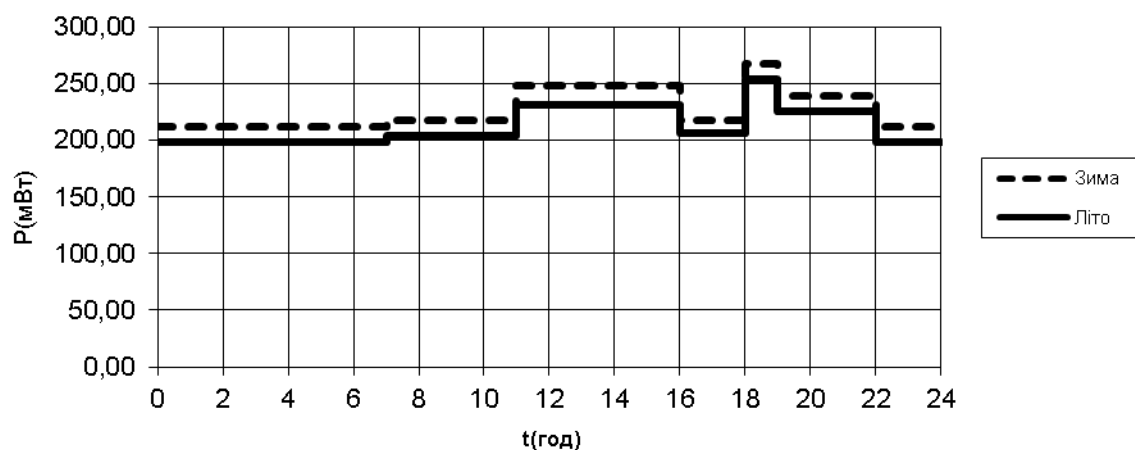


Рисунок 1.1 – Потужність, яка віддається в місцевий район

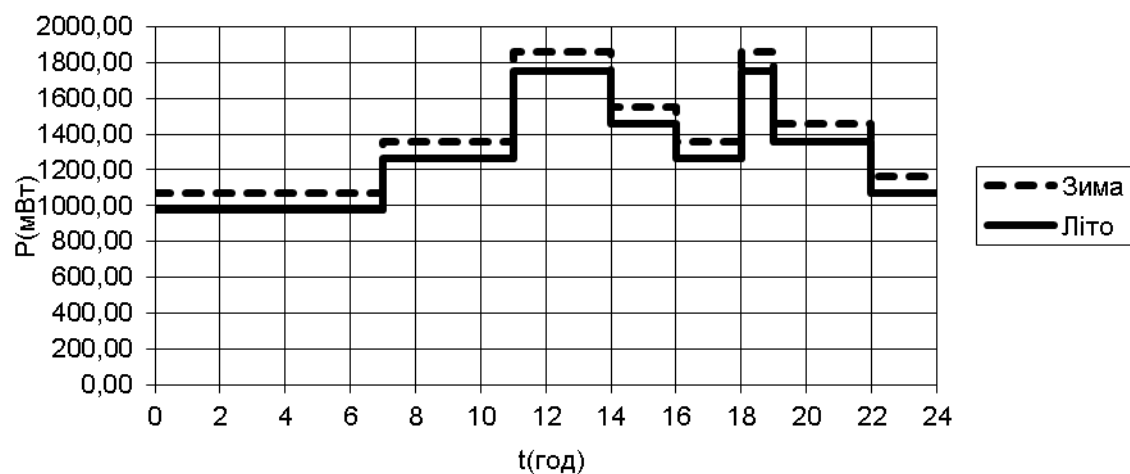


Рисунок 1.2 – Потужність, яка віддається в систему

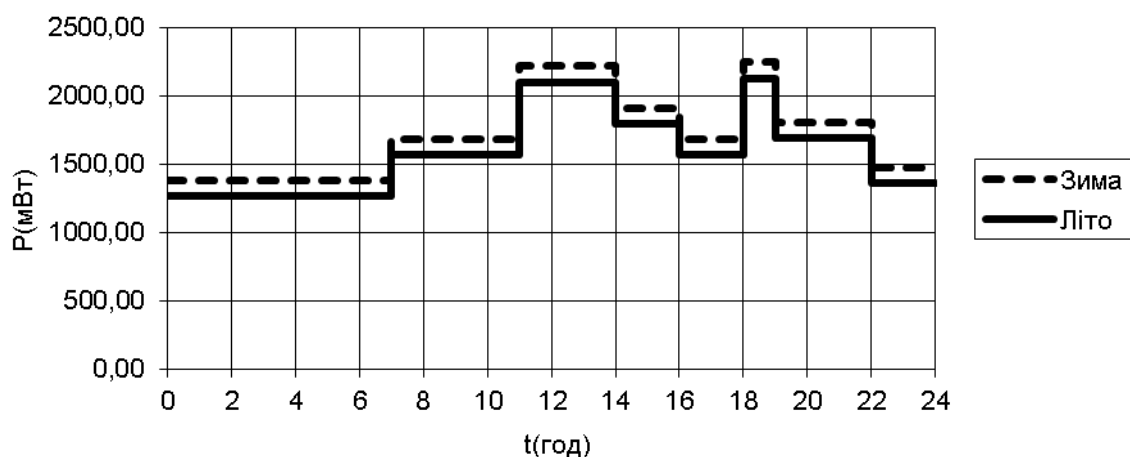


Рисунок 1.3 – Добовий графік потужності, яка виробляється генераторами

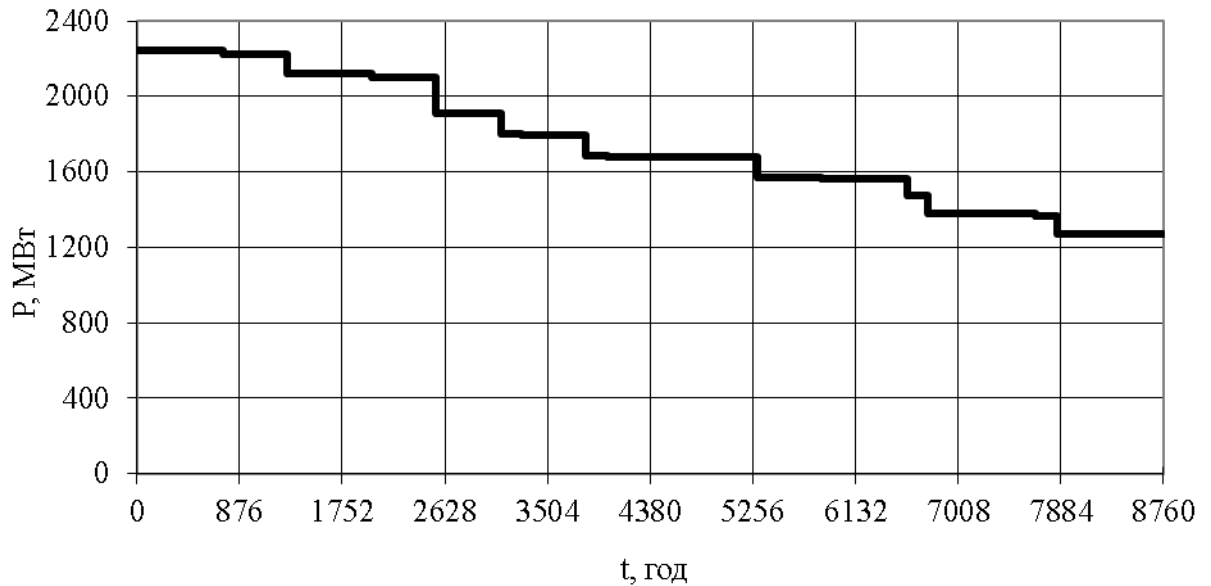


Рисунок 1.4 – Річний графік по тривалості навантаження

Використовуючи річний графік по тривалості, розрахуємо техніко-економічні показники роботи станції.

1). Максимальне навантаження станції:

$$P_{\max} = 2244,44 \text{ (МВт)}.$$

2). Річний виробіток електроенергії:

$$E_p = \sum_{i=1}^m P_{\text{вир } i} t_i, \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned}
 E_p &= \left[5 \cdot 1378,04 + 4 \cdot 1678,47 + 3 \cdot 2224,27 + 3 \cdot 1912,15 + \right. \\
 &\quad \left. + 3 \cdot 1678,47 + 4 \cdot 2244,44 + 1 \cdot 1801,83 + 1 \cdot 1475,13 \right] \times 183 + \\
 &\quad + \left[5 \cdot 1267,98 + 4 \cdot 1564,91 + 3 \cdot 2101,9 + 3 \cdot 1793,26 + \right. \\
 &\quad \left. + 3 \cdot 1567,73 + 4 \cdot 2124,82 + 1 \cdot 1686,99 + 1 \cdot 1363,92 \right] \times 182 = \\
 &= 15302515,99 \text{ (МВт} \cdot \text{год)}
 \end{aligned}$$

3). Встановлена потужність станції:

$$P_{\text{вст}} = 4 \cdot 500 + 2 \cdot 160 = 2320 \text{ (МВт)}.$$

4). Середнє навантаження станції:

$$P_{cp} = \frac{E_p}{T}, \quad (1.11)$$

$$P_{cp} = \frac{15302515,99}{8760} = 1746,86 \text{ (МВт)}.$$

5). Коефіцієнт заповнення графіка:

$$K_3 = \frac{P_{cp}}{P_{max}}, \quad (1.12)$$

$$K_3 = \frac{1746,86}{2244,44} = 0,78.$$

6). Коефіцієнт використання встановленої потужності:

$$K_B = \frac{P_{cp}}{P_{вст}}, \quad (1.13)$$

$$K_B = \frac{1746,86}{2244,44} = 0,75.$$

7). Число годин використання максимального навантаження:

$$T_{max} = \frac{E_p}{P_{max}}, \quad (1.14)$$

$$T_{max} = \frac{15302515,99}{1746,86} = 6818 \text{ (год)}.$$

8). Число годин використання встановленої потужності:

$$T_{\text{вст}} = \frac{E_p}{P_{\text{вст}}}, \quad (1.15)$$

$$T_{\text{вст}} = \frac{15302515,99}{2320} = 6596 \text{ (год)}.$$

9). Коефіцієнт резерву:

$$K_{\text{рез}} = \frac{P_{\text{вст}}}{P_{\text{max}}}; \quad (1.16)$$

$$K_{\text{рез}} = \frac{2320}{2244,44} = 1,03.$$

10). Час максимальних втрат електроенергії

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760; \quad (1.17)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{6818}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 5688 \text{ (год)}.$$

1.2 Вибір основного обладнання

Основне обладнання по можливості потрібно вибирати однотипним, тому що при цьому забезпечується можливість індустріалізації будівництва, покращуються умови експлуатації і ремонту. До основного енергетичного обладнання КЕС відносяться парогенератори та турбіни.

Номінальні параметри основного обладнання зводимо в таблиці 1.2 – 1.4.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики турбогенераторів

Параметри	Турбогенератор	
	TBB-160-2EY3	TBB-500-2EY3
$n_{\text{ном.}}$, об/хв	3000	3000
$S_{\text{ном.}}$, МВА	188	588
$P_{\text{ном.}}$, МВт	160	500
$U_{\text{ном.}}$, кВ	18	20
$\cos\varphi_{\text{ном.}}$	0,85	0,85
$I_{\text{ном.}}$, кА	5,67	17
Схема з'єднання обмоток	Y	YY
Система збудження	ТН	ТН
$U_{\text{f.ном.}}$, В	370	474
$I_{\text{f.ном.}}$, А	2020	3530
$I_{\text{fx.}}$, А	814	1075
ВКЗ	0,615	0,428
Опори, в.о.:		
X''_d	0,213	0,243
X'_d	0,304	0,355
X_d	1,713	2,56
X_2	0,25	0,295
X_0	0,1	0,141

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики турбін

Параметр	Турбіна	
	К-160-130	К-500-240
$P_{\text{ном.}}$, МВт	160	500
P , ата	130	240
t , °С	565	565
D , Т/год.	436	1500

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики котельних агрегатів

Параметр	Котельний агрегат	
	Пп-660/140	Пп-1600/255
D , Т/год.	60	1600
$P_{\text{ном.}}$, МВт	200	500
P , ата	140	255
t , °С	540	550
Паливо	вугілля	вугілля

1.3 Вибір структурної схеми станції

Визначаємо кількість ЛЕП:

$$n = P'_{\max} / P_{\text{гр.}} + 1, \quad (1.18)$$

де $P'_{\max}$ – максимальна потужність, яка видається в район або в систему з врахуванням втрат потужності, МВт;

$P_{\text{гр.}}$ – гранична потужність ЛЕП, МВт (табл. 1.1 [2]).

$$n_{500} = 1856/900 + 1 = 3,1 \approx 4 \text{ шт};$$

$$n_{220} = 267,5/200 + 1 = 2,3 \approx 3 \text{ шт};$$

Розрахункова потужність робочих трансформаторів власних потреб (ТВП):

$$S_{\text{ТВП,розр.}} = P_{\text{вп}}' / 100 \cdot K_{\text{п}} \cdot P_{\text{Г.ном}}, \quad (1.19)$$

де $P_{\text{Г.ном}}$ – номінальна потужність генератора, МВт.

$$S_{\text{ТВП,розр.}}^{500} = 6/100 \cdot 0,85 \cdot 500 = 25,5 \text{ (МВА)};$$

$$S_{\text{ТВП,розр.}}^{200} = 6/100 \cdot 0,85 \cdot 160 = 8,16 \text{ (МВА)};$$

Розрахункова потужність пускорезервного трансформатора власних потреб:

$$S_{\text{ТР розр.}} = 1,3 \cdot S_{\text{ТВП,розр.}}, \quad (1.20)$$

$$S_{\text{ТР розр.}} = 1,3 \cdot 25,5 = 33,15 \text{ (МВА)}.$$

Згідно вимог ТВП для генераторів потужністю більше 160 МВт повинні бути з розщепленою обмоткою НН та мати пристрій РПН. Встановлюємо для генераторів 160 МВт ТВП типу ТДНС-10000/35, а для генераторів 500 МВт – ТРДНС-32000/35.

Згідно [2] встановлюємо два пускорезервних трансформатори, один з яких підключаємо до сторони НН АТЗ, другий – до ВРУ СН 220 кВ.

Намічаємо два варіанти структурної схеми станції (рисунок 1.5).

Розрахункова потужність блочних трансформаторів:

$$S_{\text{БТ. розр.}} = S_{\text{Т}} - S_{\text{ВП.мах}}; \quad (1.21)$$

$$S_{\text{БТ.1 розр}} = 588 - 25,5 = 562,5 \text{ (МВА)};$$

$$S_{\text{БТ.2 розр}} = 188 - 8,16 = 179,84 \text{ (МВА)};$$

$$S_{\text{БТ.3 розр}} = 2(188 - 8,16) = 359,68 \text{ (МВА)}.$$

Розрахункова потужність автотрансформаторів зв'язку [2]:

а) максимальний режим:

$$S_{\text{мах}} = S_{\text{Г.вст}} - S_{\text{ВП.мах}} - S_{\text{р.мах}}, \quad (1.22)$$

$$S_{\text{мах}} = 2(188 - 8,16) - 267,5/0,85 = 45 \text{ (МВА)};$$

б) мінімальний режим:

$$S_{\text{мін}} = S_{\text{Г.вст}} - S_{\text{ВП.мах}} - S_{\text{р.мін}}; \quad (1.23)$$

$$S_{\text{мін}} = 2(188 - 8,16) - 198,44/0,85 = 126,2 \text{ (МВА)};$$

в) аварійний режим:

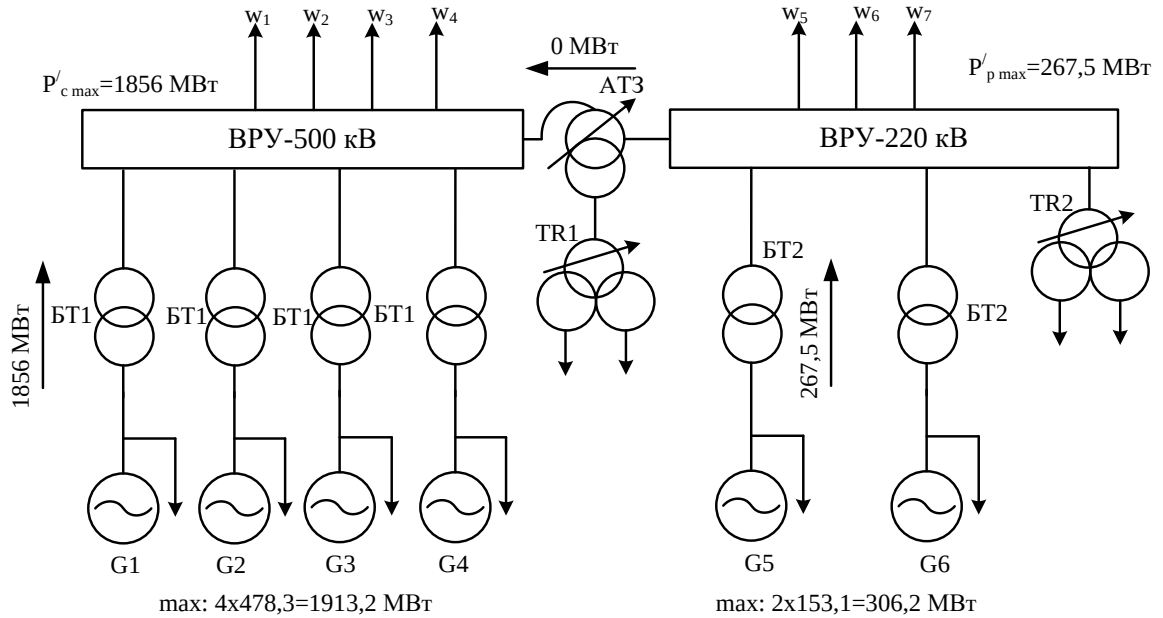
$$S_{\text{ав}} = S_{\text{Г.вст-1}} - S_{\text{ВП.мах}} - S_{\text{р.мах}}, \quad (1.24)$$

$$S_{\text{ав}} = 1(188 - 8,16) - 267,5/0,85 = - 134,9 \text{ МВА}.$$

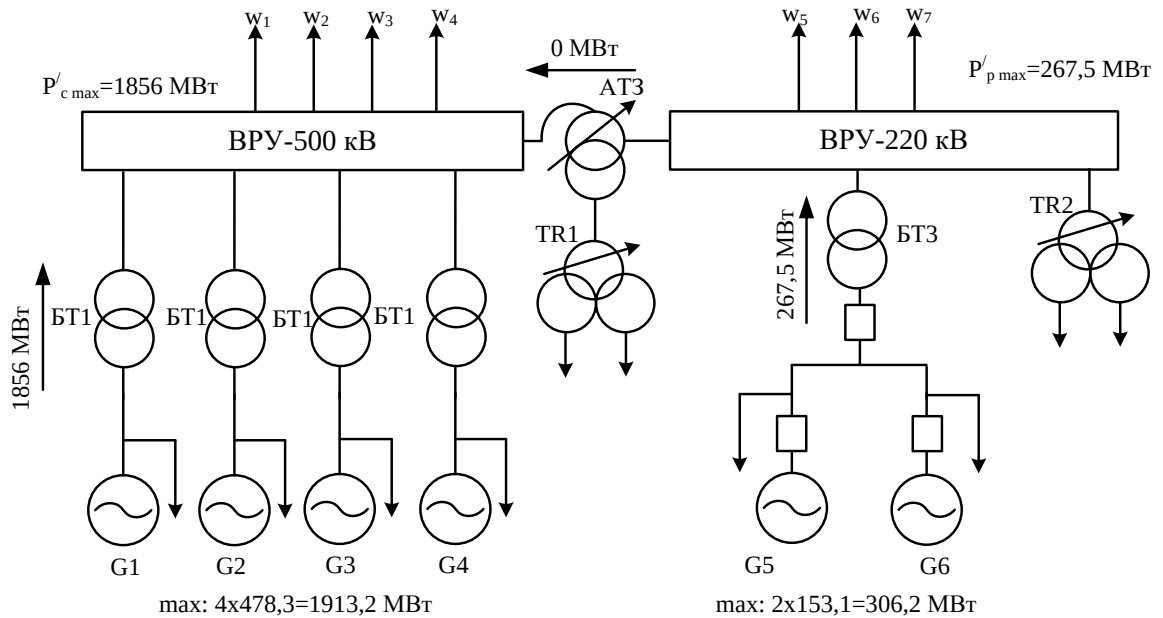
Встановлюємо одну групу однофазних автотрансформаторів типу АОДЦТН-167000/500/220 [4] додатково встановлюємо резервну фазу:

$$S_{T.HOM} = 167(\text{MBA}); U_{T.HOM} = \frac{500}{\sqrt{3}} / \frac{230}{\sqrt{3}} / 38,5 \text{ кВ}; \Delta P_x = 90 (\text{кВт});$$

$$\Delta P_k = 315 (\text{кВт}); U_{k.BC} = 11\%; U_{k.BH} = 35\%; U_{k.BC} = 21,5\%; I_x = 0,25\%.$$



а) варіант 1



б) варіант 2

Рисунок 1.5 – Структурні схеми станції

Технічні характеристики трансформаторів наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики трансформаторів

Позна- чення	Тип трансформатора	$S_{\text{НОМ.}}$, МВА	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$U_{\text{к}}$, %	$\Delta P_{\text{х}}$, кВт	$\Delta P_{\text{к}}$, кВт
ТВП1-4	ТРДНС-32000/35	32	20/6,3-6,3	12,7	29	145
ТВП5,6	ТДНС-10000/35	10	18/6,3	10	12	60
TR ₁	ТРДНС-40000/35	40	36,75/6,3-6,3	12,7	36	170
TR ₂	ТРДНС-40000/220	40	230/6,3-6,3	11,5	50	170
BT ₁	ТЦ-630000/500	630	525/20	14	420	1210
BT ₂	ТДЦ-200000/220	200	242/18	11	130	660
BT ₃	ТДЦ-400000/220	400	242/18	11	330	880

Приведенні затрати:

$$Z = p_{\text{н}} \cdot K + U = p_{\text{н}} \cdot K + \left(\frac{a}{100} \cdot K + B \Delta W \right), \quad (1.25)$$

де $p_{\text{н}} = 0,12$ – нормований коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

K – капіталовкладення в електроустановку, тис. грн;

U – щорічні експлуатаційні витрати, тис. грн. ;

a – норма відрахувань на амортизацію та обслуговування, %;

$a=8,4\%$ – для класів напруг 220 кВ і вище;

$B = 20 \frac{\text{коп.}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$ – вартість 1 кВт·год втраченої електроенергії;

ΔW – річні втрати електроенергії працюючих трансформаторів, кВт·год.

$$\Delta W = n \cdot \Delta P_{\text{х}} \cdot 8760 + \frac{1}{n} \Delta P_{\text{кз}} \left(\frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 \cdot \tau, \quad (1.26)$$

де n – число паралельно працюючих трансформаторів.

Таблиця 1.6 — Капіталовкладення в електроустановку

Обладнання	Кількість, шт. (1в./2в.)	Вартість одиниці, тис.грн.	Капіталовкладення	
			1 варіант	2 варіант
БТ1	4/4	16750	67000	67000
БТ2	2/0	7200	14400	14400
БТ3	0/1	10500	0	10500
АТЗ	1/1	20000	20000	20000
Вимикачі:				
500 кВ (схема 4/3)	12/12	14000	168000	168000
220 кВ (схема 2СШ з обхідною)	9/8	3900	35100	31200
генераторні	0/3	375	0	1125
Разом:			304500	312225

Визначимо втрати електроенергії в трансформаторах:

$$\Delta W_1 = \Delta W_{\text{БТ1}} + \Delta W_{\text{БТ2}} + \Delta W_{\text{АТЗ}};$$

$$\Delta W_2 = \Delta W_{\text{БТ1}} + \Delta W_{\text{БТ3}} + \Delta W_{\text{АТЗ}};$$

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= 4 \cdot 420 \cdot 8760 + \frac{1}{4} \cdot 1210 \left(\frac{2183,5}{630} \right)^2 \cdot 5688 + 2 \cdot 130 \cdot 8760 + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot 660 \left(\frac{314,7}{200} \right)^2 \cdot 5688 + 1 \cdot 3 \cdot 90 \cdot 8760 + \frac{3}{1} \cdot 315 \left(\frac{0}{167} \right)^2 \cdot 5688 = \\ &= 44675529,5 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_2 &= 4 \cdot 420 \cdot 8760 + \frac{1}{4} \cdot 1210 \left(\frac{2183,5}{630} \right)^2 \cdot 5688 + 1 \cdot 330 \cdot 8760 + \\ &+ \frac{1}{1} \cdot 880 \left(\frac{314,7}{200} \right)^2 \cdot 5688 + 1 \cdot 3 \cdot 90 \cdot 8760 + \frac{3}{1} \cdot 315 \left(\frac{0}{167} \right)^2 \cdot 5688 = \\ &= 53034342,08 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \end{aligned}$$

Щорічні експлуатаційні витрати:

$$U_1 = 0,084 \cdot 304500 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 44675529,5 = 34513,11 \text{ тис.грн};$$

$$U_2 = 0,084 \cdot 312225 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 53034342,08 = 36833,77 \text{ тис.грн.}$$

Приведенні затрати:

$$З_1 = 0,12 \cdot 304500 + 34513,11 = 71053,11 \text{ тис.грн.}$$

$$З_2 = 0,12 \cdot 312225 + 36833,77 = 74300,77 \text{ тис.грн.}$$

$\Delta З = 4,5 \% < 5\%$, отже, варіанти рівно економічні. Остаточного приймаємо І-й варіант структурної схеми як зручнішу в експлуатації.

1.4 Вибір схем ВРУ-500 та 220 кВ

Для ВРУ-220 кВ приймаємо, згідно рекомендацій [2, 3], типову схему: «дві робочі та обхідна системи збірних шин» (рисунк 1.6).

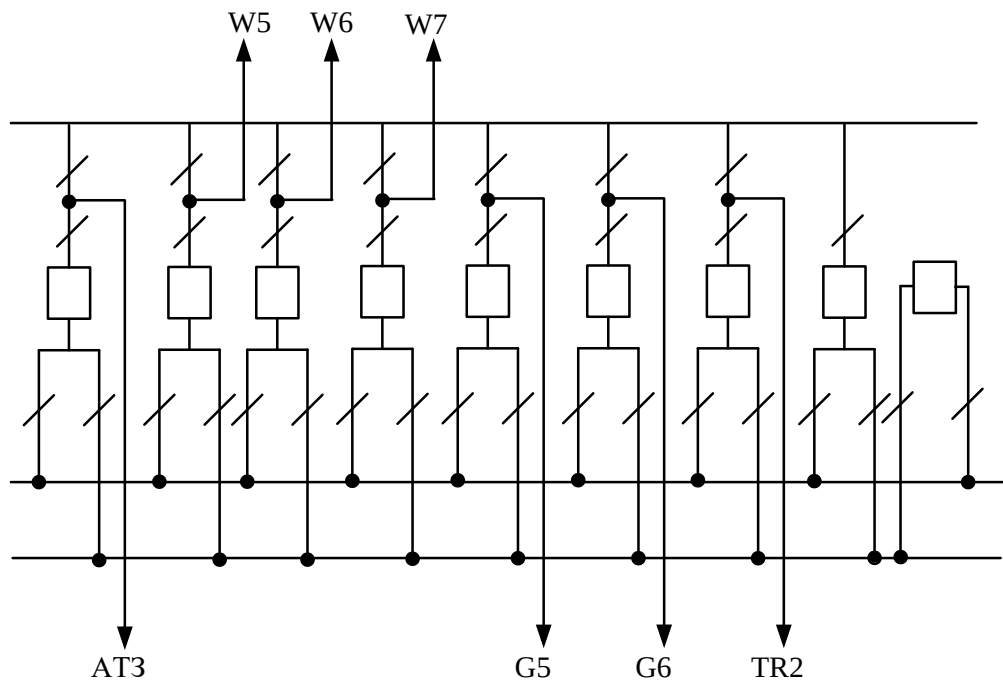


Рисунок 2.6 – Схема ВРУ-220 кВ

Схему ВРУ-500 кВ розрахована в розділі[3] .

1.5 Вибір схеми власних потреб

Кожен турбогенератор має робочий трансформатор власних потреб (ТВП) з двома секціями (А,В) на стороні 6 кВ, до яких підключаються споживачі (двигуни та трансформатори 6/04 кВ). Резервне живлення здійснюється від трьох пускорезервних трансформаторів (ТР) (із них один не підключений, а в складському резерві) через магістраль резервного живлення (МРЖ-6 кВ), а аварійне – забезпечується дизель-генератором.

Схема власних потреб станції представлена на рисунку 1.8.

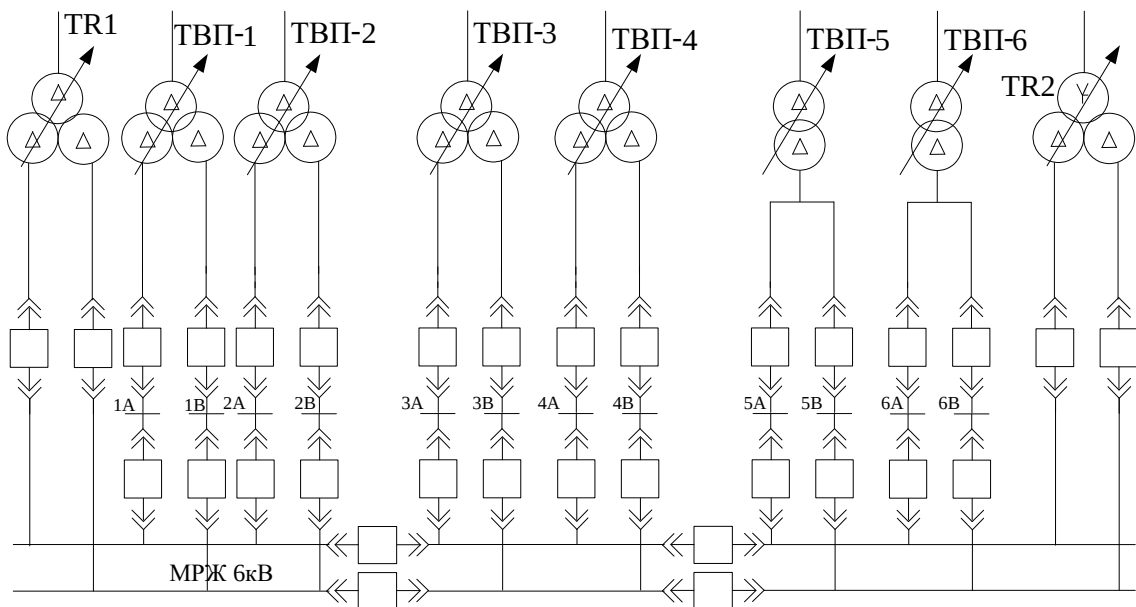


Рисунок 1.8 – Схема власних потреб станції

Всі трансформатори 6 кВ мають пристрій РПН для регулювання напруги, магістраль резервного живлення для підвищення надійності схеми секціонована.

Для живлення споживачів 0,4 кВ до кожної секції підключаємо по два трансформатори типу ТСЗ-630/10 [3]:

$$S_{\text{НОМ}} = 630 \text{ кВА}, U_{\text{НОМ}} = 6/0,4 \text{ кВ}, U_K = 8\%, \Delta P_x = 2 \text{ кВт}, \Delta P_x = 8,5 \text{ кВт}, I_x = 2\%.$$

1.6 Розрахунок струмів короткого замикання

Складаємо заступну схему електроустановки (рисунок 1.9) та визначаємо параметри її елементів [2]: $S_6=1000$ МВТ, $U_6= U_{\text{ср.ном}}$.

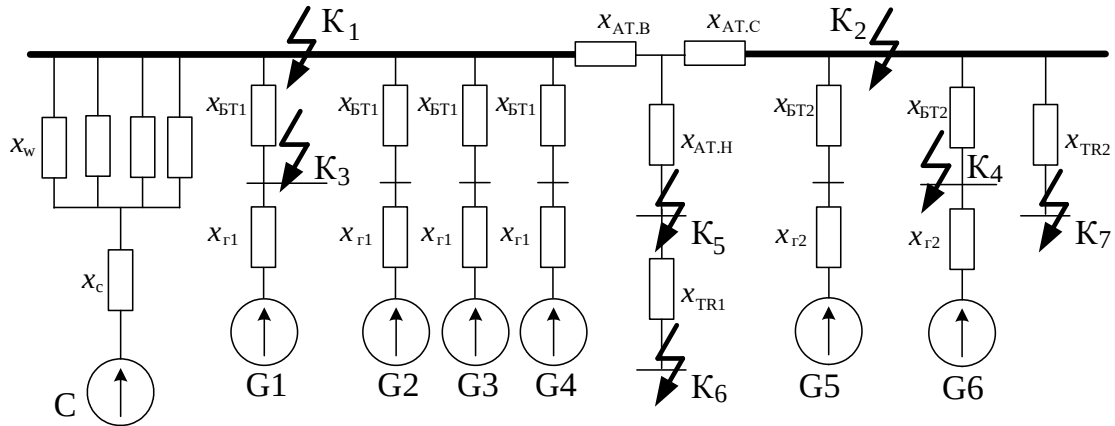


Рисунок 2.9 – Заступна схема електроустановки

Визначимо параметри елементів заступної схеми:

– генератор:

$$X_{\Gamma} = x_d // \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} ; \quad (1.31)$$

$$x_{\Gamma 1} = 0,243 \cdot \frac{1000}{588} = 0,413;$$

$$x_{\Gamma 2} = 0,213 \cdot \frac{1000}{188} = 1,133;$$

– ЛЕП-500 кВ:

$$x_w = x_{\text{пит}} \cdot 1 \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2}; \quad (1.32)$$

$$x_w = 0,3 \cdot 780 \cdot \frac{1000}{515^2} = 0,882 ;$$

– система:

$$X_c = X_{*c.HOM} \cdot \frac{S_6}{S_{*HOM}}; \quad (1.33)$$

$$X_c = 0,26 \cdot \frac{1000}{18200} = 0,014;$$

– блочний трансформатор:

$$X_{6T} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{T.HOM}}; \quad (1.34)$$

$$X_{6T1} = \frac{14}{100} \cdot \frac{1000}{630} = 0,22;$$

$$X_{6T2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{200} = 0,55;$$

– АТЗ:

$$\left. \begin{aligned} X_{AT.B} &= \frac{u_{KB\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{T.HOM}}; \\ X_{AT.C} &= \frac{u_{KC\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{T.HOM}}; \\ X_{AT.H} &= \frac{u_{KH\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{T.HOM}}; \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{KB\%} &= 0,5 \cdot (u_{KB-H\%} + u_{KB-C\%} - u_{KB-H\%}); \\ u_{KC\%} &= 0,5 \cdot (u_{KB-C\%} + u_{KB-H\%} - u_{KB-H\%}); \\ u_{KH\%} &= 0,5 \cdot (u_{KB-H\%} + u_{KB-C\%} - u_{KB-C\%}). \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

$$u_{KB\%} = 0,5 \cdot (35 + 11 - 21,5) = 12,25 \%;$$

$$u_{KC\%} = 0,5 \cdot (11 + 21,5 - 35) = -1,25 = 0\%;$$

$$u_{KH\%} = 0,5 \cdot (35 + 21,5 - 11) = 22,75 \%.$$

$$X_{AT.B} = \frac{12,25}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 167} = 0,24;$$

$$X_{AT.C} = 0;$$

$$X_{AT.H} = \frac{22,75}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 167} = 0,45.$$

– Пускорезервный трансформатор з розщепленою обмоткою:

$$x_{TR} = \frac{1,875 u_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном.Т}}}; \quad (1.37)$$

$$x_{TR1} = \frac{1,875 \cdot 12,7}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 5,95;$$

$$x_{TR2} = \frac{1,875 \cdot 11,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 5,39.$$

Спростимо заступну схему (рисунок 1.10).

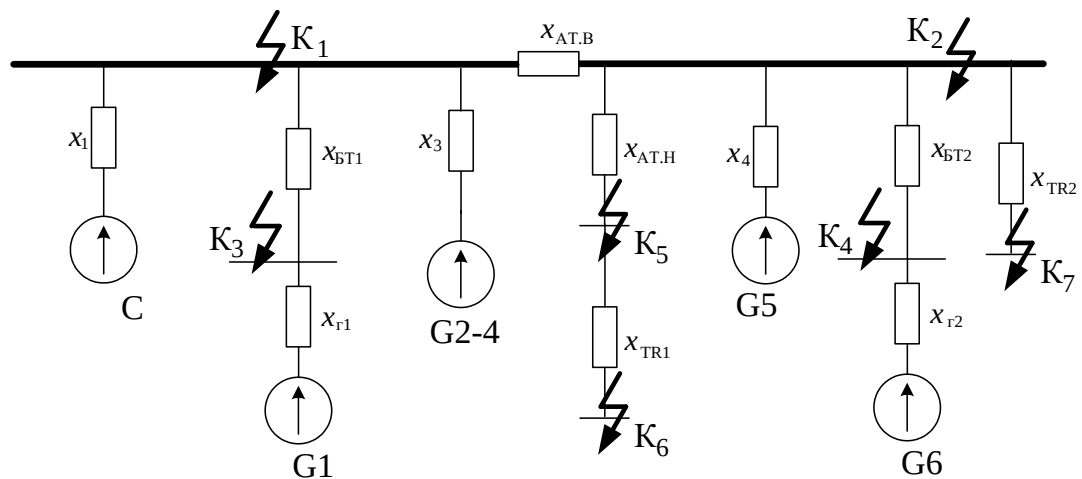


Рисунок 1.10 – Спрощена заступна схема електроустановки

$$x_1 = x_w / 4 + x_C;$$

$$x_1 = 0,882/4 + 0,014 = 0,235;$$

$$x_2 = x_{Г1} + x_{6T1};$$

$$x_2 = 0,413 + 0,22 = 0,633.$$

$$x_3 = x_2 / 3;$$

$$x_3 = 0,633/3 = 0,211;$$

$$x_4 = x_{Г2} + x_{6T2};$$

$$x_4 = 1,133 + 0,55 = 1,683.$$

Базовий струм [2, 5]:

$$I_{6i} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot S_{\text{сер.ном}}}; \quad (1.38)$$

$$I_{61} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 515) = 1,12 \text{ кА};$$

$$I_{62} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 230) = 2,51 \text{ кА};$$

$$I_{63} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 20) = 28,87 \text{ кА};$$

$$I_{64} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 18) = 32,075 \text{ кА};$$

$$I_{65} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 37) = 15,6 \text{ кА};$$

$$I_{66} = I_{67} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 6,3) = 91,64 \text{ кА}.$$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{\text{по}} = \frac{E_{*}^{//}}{X_{* \text{рез.}}} \cdot I_{6i}; \quad (1.39)$$

де $E_{*}^{//}$ – для генераторів: 1,13;

$E_{*}^{//}$ – для енергосистеми та власних потреб: 1;

$X_{* \text{рез.}}$ – результуючий опір кола КЗ, в.о.

Визначимо складові струмів КЗ [2]:

– періодичну:

$$I_{\text{нт}} = \gamma_{\text{нт}} \cdot I_{\text{по}}; \quad (1.40)$$

– аперіодичну:

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{по}} \cdot e^{-\tau/T_a}; \quad (1.41)$$

– ударний струм:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{\text{по}} \cdot K_y, \quad (1.42)$$

де $\tau = t_{\text{ВВ}} + 0,01$;

$t_{\text{ВВ}}$ – власний час вимикання вимикача;

$\gamma_{\text{пт}}$ – коефіцієнт;

T_a – постійна часу кола КЗ, с;

K_y – ударний коефіцієнт.

Спростимо заступну схему електроустановки для кожної точки КЗ.

К-1:

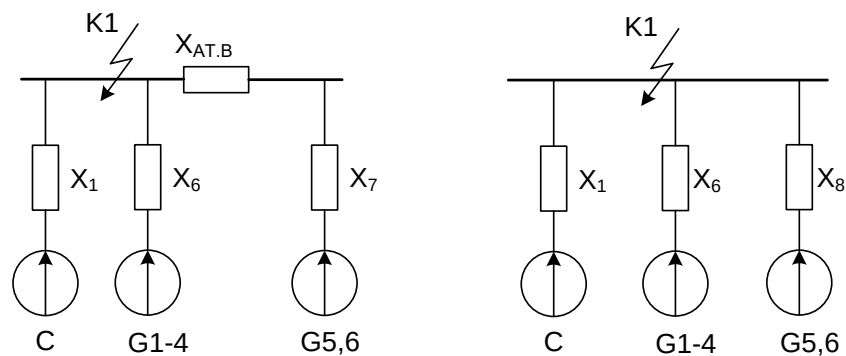


Рисунок 1.11– Спрощення заступної схеми для точки К-1

$$x_6 = x_2 / 4;$$

$$x_6 = 0,633/4 = 0,16;$$

$$x_7 = x_4 / 2;$$

$$x_7 = 1,683/2 = 0,842;$$

$$x_8 = x_7 + x_{\text{АТ.В}};$$

$$x_8 = 0,842 + 0,24 = 1,082;$$

$$I_{\text{поС}} = \frac{1}{0,235} \cdot 1,12 = 4,766 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{поG1-4}} = \frac{1,13}{0,16} \cdot 1,12 = 7,91 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G5,6}} = \frac{1,13}{1,082} \cdot 1,12 = 1,170 \text{ (кА)}.$$

Аналогічно проведемо розрахунок струмів $I_{\text{по}}$ для інших точок КЗ.

К-2:

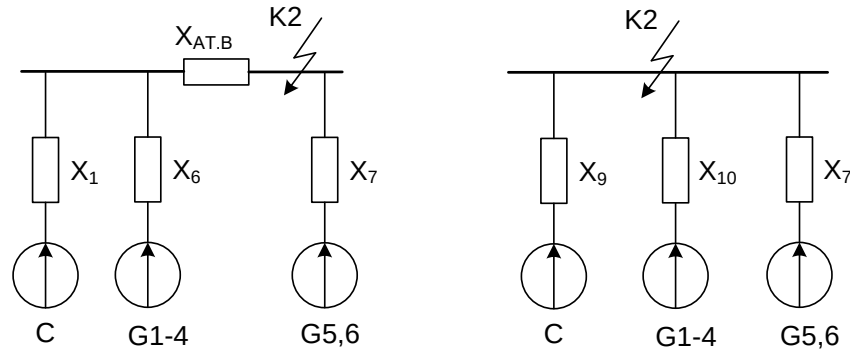


Рисунок 1.12 – Спрощення заступної схеми для точки К-2

Розподіляємо $x_{\text{AT.B}}$ між x_1 та x_6 [2]:

$$x_{\Delta} = x_{\text{AT.B}} \cdot (x_1 + x_6);$$

$$x_9 = x_1 + x_{\Delta} / x_6;$$

$$x_{10} = x_6 + x_{\Delta} / x_1.$$

$$x_{\Delta} = 0,24 \cdot (0,235 + 0,16) = 0,095;$$

$$x_9 = 0,235 + 0,095 / 0,16 = 0,829;$$

$$x_{10} = 0,16 + 0,095 / 0,235 = 0,564;$$

$$I_{\text{по C}} = \frac{1}{0,829} \cdot 2,51 = 3,028 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G1-4}} = \frac{1,13}{0,564} \cdot 2,51 = 5,09 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G5,6}} = \frac{1,13}{0,842} \cdot 2,51 = 3,369 \text{ (кА)}.$$

К-3:

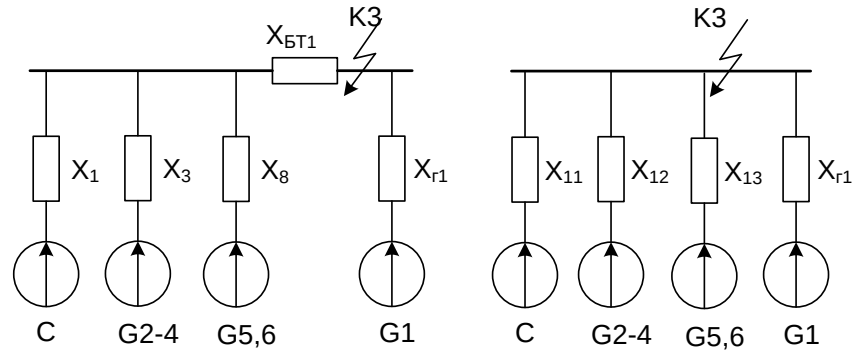


Рисунок 1.13 – Спрощення заступної схеми для точки К-3

Розподіляємо $X_{БТ1}$ між x_1 , x_3 та x_8 [2]:

$$x_{\Delta} = x_{БТ1} \cdot (x_1 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_8 + x_3 \cdot x_8);$$

$$x_{11} = x_1 + \frac{x_{\Delta}}{x_3 \cdot x_8};$$

$$x_{12} = x_3 + \frac{x_{\Delta}}{x_1 \cdot x_8};$$

$$x_{13} = x_8 + \frac{x_{\Delta}}{x_3 \cdot x_1};$$

$$x_{\Delta} = 0,22 \cdot (0,235 \cdot 0,211 + 0,235 \cdot 1,082 + 0,211 \cdot 1,082) = 0,117;$$

$$x_{11} = 0,235 + \frac{0,117}{0,211 \cdot 1,082} = 0,747;$$

$$x_{12} = 0,211 + \frac{0,117}{0,235 \cdot 1,082} = 0,671;$$

$$x_{13} = 1,082 + \frac{0,117}{0,211 \cdot 0,235} = 3,442.$$

$$I_{по C} = \frac{1}{0,747} \cdot 28,87 = 38,648 \text{ (кА)};$$

$$I_{по G2-4} = \frac{1,13}{0,671} \cdot 28,87 = 48,691 \text{ (кА)};$$

$$I_{по G5,6} = \frac{1,13}{3,442} \cdot 28,87 = 9,478 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G1}} = \frac{1,13}{0,413} \cdot 28,87 = 78,991 \text{ (кА)}.$$

К-4:

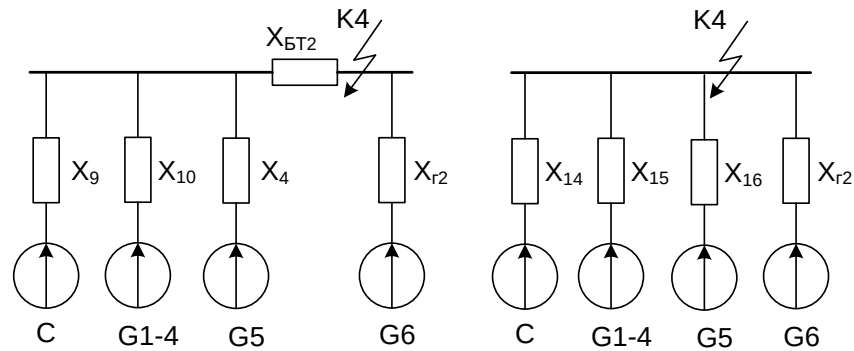


Рисунок 1.14 – Спрощення заступної схеми для точки К-4

Розподіляємо $x_{\text{БТ2}}$ між x_9 , x_{10} та x_5 [2]:

$$x_{\Delta} = x_{\text{БТ2}} \cdot (x_9 \cdot x_{10} + x_9 \cdot x_4 + x_{10} \cdot x_4);$$

$$x_{14} = x_9 + \frac{x_{\Delta}}{x_{10} \cdot x_5};$$

$$x_{15} = x_{10} + \frac{x_{\Delta}}{x_9 \cdot x_5};$$

$$x_{16} = x_5 + \frac{x_{\Delta}}{x_{10} \cdot x_9};$$

$$x_{\Delta} = 0,55 \cdot (0,829 \cdot 0,564 + 0,829 \cdot 1,683 + 0,564 \cdot 1,683) = 1,361;$$

$$x_{14} = 0,829 + \frac{1,361}{0,564 \cdot 1,683} = 2,263;$$

$$x_{15} = 0,564 + \frac{1,361}{0,829 \cdot 1,683} = 1,539;$$

$$x_{16} = 1,683 + \frac{1,361}{0,564 \cdot 0,829} = 4,594.$$

$$I_{\text{по C}} = \frac{1}{2,263} \cdot 32,075 = 14,174 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G1-4}} = \frac{1,13}{1,539} \cdot 32,075 = 23,551 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G5}} = \frac{1,13}{4,594} \cdot 32,075 = 7,89 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G6}} = \frac{1,13}{1,133} \cdot 32,075 = 31,99 \text{ (кА)}.$$

K-5:

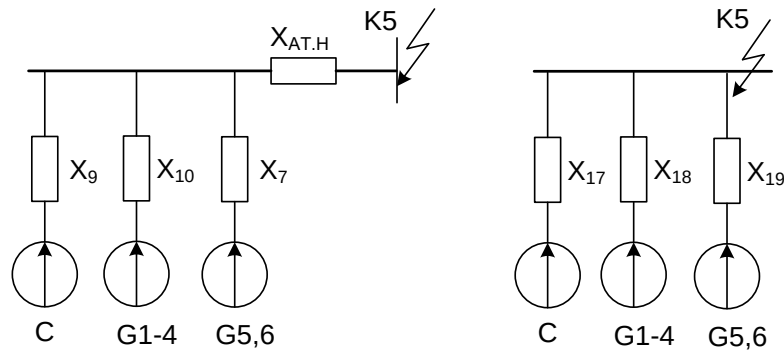


Рисунок 1.15 – Спрощення заступної схеми для точки K-5

Розподіляємо $x_{\text{AT.H}}$ між x_9 , x_{10} та x_7 [2]:

$$x_{\Delta} = x_{\text{AT.H}} \cdot (x_9 \cdot x_{10} + x_9 \cdot x_7 + x_{10} \cdot x_7);$$

$$x_{17} = x_9 + \frac{x_{\Delta}}{x_{10} \cdot x_7};$$

$$x_{18} = x_{10} + \frac{x_{\Delta}}{x_9 \cdot x_7};$$

$$x_{19} = x_7 + \frac{x_{\Delta}}{x_{10} \cdot x_9};$$

$$x_{\Delta} = 0,45 \cdot (0,829 \cdot 0,564 + 0,829 \cdot 0,842 + 0,564 \cdot 0,842) = 0,738;$$

$$x_{17} = 0,829 + \frac{0,738}{0,564 \cdot 0,842} = 2,383;$$

$$x_{18} = 0,564 + \frac{0,738}{0,829 \cdot 0,842} = 1,621;$$

$$x_{19} = 0,842 + \frac{0,738}{0,564 \cdot 0,829} = 2,42.$$

$$I_{\text{по C}} = \frac{1}{2,383} \cdot 15,6 = 6,546 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G1-4}} = \frac{1,13}{1,621} \cdot 15,6 = 10,875 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{по G5,6}} = \frac{1,13}{2,42} \cdot 15,6 = 7,284 \text{ (кА)}.$$

K-6:

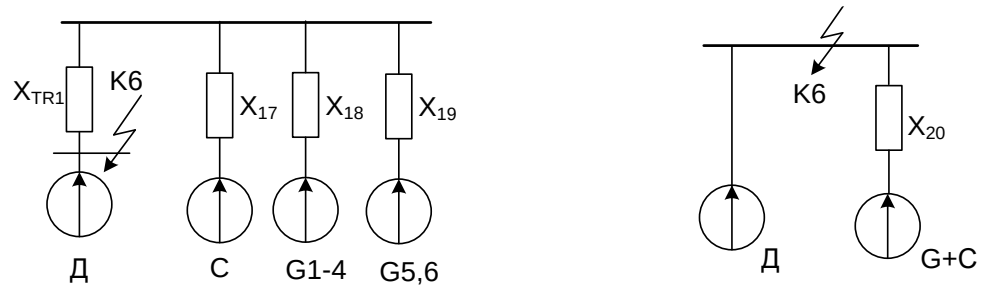


Рисунок 1.16 – Спрощення заступної схеми для точки K-6

$$x_{20} = \frac{1}{\frac{1}{x_{17}} + \frac{1}{x_{18}} + \frac{1}{x_{19}}} + x_{\text{TR1}};$$

$$x_{20} = \frac{1}{\frac{1}{2,383} + \frac{1}{1,621} + \frac{1}{2,42}} + 5,95 = 6,64;$$

$$I_{\text{нос+д}} = \frac{1}{6,64} \cdot 91,64 = 13,801 \text{ (кА)}.$$

$$I_{\text{по Д}} = \frac{4 \Sigma P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}, \quad (2.43)$$

де $\Sigma P_{\text{НОМ}} = 1,25 S_{\text{TR,розр.}}$;

$$I_{\text{по Д}} = 1,25 \cdot \frac{33,15 \cdot 4}{2 \cdot 6} = 13,833 \text{ (кА)}.$$

K-7:

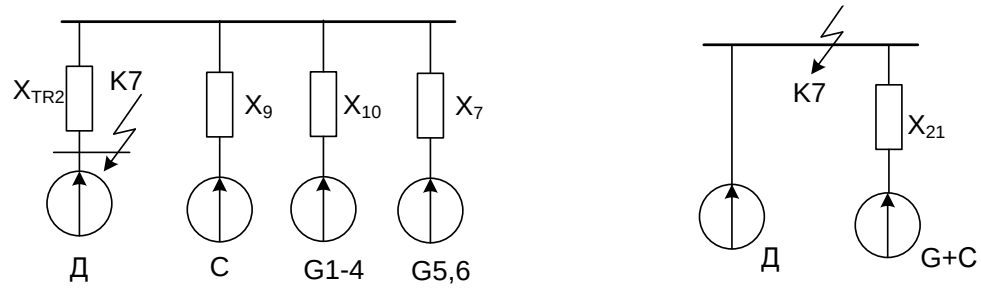


Рисунок 1.17 – Спрощення заступної схеми для точки K-7

$$X_{21} = \frac{1}{\frac{1}{X_9} + \frac{1}{X_{10}} + \frac{1}{X_7}} + X_{TR2};$$

$$X_{21} = \frac{1}{\frac{1}{0,829} + \frac{1}{0,564} + \frac{1}{0,842}} + 5,39 = 5,63.$$

$$I_{\text{нос+д}} = \frac{1}{5,63} \cdot 91,64 = 16,277 \text{ (кА)}.$$

Для РУВП-6 кВ за розрахункову приймаємо точку K-7.

Попередньо встановлюємо вимикачі [2]:

а) ВРУ-500 кВ	ЗАТ2/DT-550	$t_{\text{БВ}}=0,018 \text{ с.};$
б) ВРУ-220 кВ	3AP1DT-245/ЕК	$t_{\text{БВ}}=0,037 \text{ с.};$
в) Сторона 35 кВ АТЗ	ВБНК-35	$t_{\text{БВ}}=0,05 \text{ с.};$
г) РУ ВП-6 кВ	ВР2-10	$t_{\text{БВ}}=0,04 \text{ с.}$

Визначаємо коефіцієнти $\gamma_{\text{пт}}$ для генераторних віток.

K₁: а) G₁₋₄:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 515} = 4,56 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{7,91}{4,56} = 1,73; \text{ з [2, Рисунок 4.2]: } \gamma_{\text{п,т}} = 0,98.$$

б) G_{5,6}:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot 188}{\sqrt{3} \cdot 515} = 0,422 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{НО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{1,17}{0,422} = 2,8; \text{ з [2, Рисунок 4.2]: } \gamma_{\text{н},\tau} = 0,96.$$

K₂: а) G₁₋₄:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 230} = 5,9 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{НО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{5,029}{5,9} = 0,85 < 1; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

б) G_{5,6}:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot 188}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,944 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{НО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{3,369}{0,944} = 3,6; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,91.$$

K₃: а) G₁:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{588}{\sqrt{3} \cdot 20} = 29,4 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{НО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{78,991}{29,4} = 2,7; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,96.$$

б) G₂₋₄:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{3 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 20} = 50,92 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{НО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{48,619}{50,92} = 0,95; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

в) G_{5,6}:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot 188}{\sqrt{3} \cdot 20} = 10,85 \text{ (кА)};$$

$$\frac{I_{\text{НО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{9,478}{10,85} = 0,87; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

K₄: а) G₆:

$$I'_{\text{НОМ}G6} = \frac{188}{\sqrt{3} \cdot 18} = 6,03(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{31,99}{6,03} = 5,3; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,86.$$

б) G_{1-4} :

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 18} = 75,44(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{23,551}{75,44} = 0,31 < 1; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

в) G_5 :

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{1 \cdot 188}{\sqrt{3} \cdot 18} = 6,03(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{7,89}{6,03} = 1,3; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,98.$$

K_5 : а) G_{1-4} :

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{4 \cdot 588}{\sqrt{3} \cdot 37} = 36,7(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{10,875}{36,7} = 0,3 < 1; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 1.$$

б) $G_{5,6}$:

$$I'_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot 188}{\sqrt{3} \cdot 37} = 5,87(\text{кА});$$

$$\frac{I_{\text{ПО}}}{I'_{\text{НОМ}}} = \frac{7,284}{5,87} = 1,24; \quad \gamma_{\text{н},\tau} = 0,98.$$

Результати розрахунку струмів КЗ зводимо в таблиці 1.13 і 1.14.

Визначимо складові струму КЗ від двигунів ВП [2]:

$$\left. \begin{aligned} I_{нт,ДВ} &= I_{но,ДВ} \cdot e^{-\tau/0,07}; \\ i_{ат,ДВ} &= \sqrt{2} \cdot I_{но,ДВ} \cdot e^{-\tau/0,04}; \\ i_{у,ДВ} &= \sqrt{2} \cdot I_{но,ДВ} \cdot K_{у,ДВ}. \end{aligned} \right\} \quad (1.44)$$

$$I_{нт,ДВ} = 13,833 \cdot e^{-0,05/0,07} = 6,772 \text{ (кА)};$$

$$i_{ат,ДВ} = \sqrt{2} \cdot 13,833 \cdot e^{-0,05/0,04} = 5,604 \text{ (кА)};$$

$$i_{у,ДВ} = \sqrt{2} \cdot 13,833 \cdot 1,65 = 32,275 \text{ (кА)}.$$

Таблиця 1.13 – Дані для визначення складових струмів КЗ

Точка КЗ	Вітка живлення	K_y	$T_a, \text{с}$	$\tau, \text{с}$	$e^{-\tau/T_a}$	$\gamma_{n,\tau}$
К-1 ВРУ-500 кВ	Система	1,85	0,06	0,03	0,627	1,0
	Г 1-4	1,983	0,35	0,03	0,923	0,98
	Г 5,6	1,955	0,26	0,03	0,898	0,96
К-2 ВРУ-220 кВ	Система	1,717	0,03	0,045	0,209	1,0
	Г 1-4	1,983	0,35	0,045	0,874	1,0
	Г 5,6	1,955	0,26	0,045	0,835	0,91
К-3 Г1 500 МВТ	Система	1,85	0,06	0,03	0,627	1,0
	Г 2-4	1,983	0,35	0,03	0,923	1,0
	Г 5,6	1,955	0,26	0,03	0,898	1,0
	Г 1	1,971	0,34	0,03	0,921	0,96
К-4 Г6 160 МВТ	Система	1,85	0,06	0,045	0,457	1,0
	Г 1-4	1,983	0,35	0,045	0,874	1,0
	Г 5	1,955	0,26	0,045	0,835	0,98
	Г 6	1,963	0,267	0,045	0,839	0,86
К-5 НН АТЗ 35 кВ	Система	1,85	0,06	0,06	0,368	1,0
	Г 1-4	1,983	0,35	0,06	0,842	1,0
	Г 5,6	1,955	0,26	0,06	0,794	0,98
К-6, К-7 РУ ВП-6 кВ	С + Г 1-6	1,83	0,054	0,05	0,396	1,0
	Двигуни	1,65	0,04	0,05	0,287	1,0

Таблиця 1.14 – Таблиця результатів розрахунку струмів КЗ

Точка КЗ	Вітка живлення	$I_{n0}, \text{кА}$	$i_y, \text{кА}$	$i_{at}, \text{кА}$	$I_{nt}, \text{кА}$	Примітка
----------	----------------	---------------------	------------------	---------------------	---------------------	----------

К-1 ВРУ- 500	Система	4,766	12,467	4,226	4,766	Комут. апар. і шини
	Г 1-4	7,910	22,179	10,325	7,752	
	Г 5,6	1,170	3,233	1,485	1,123	
	Сума	13,846	37,880	16,036	13,641	
К-2 ВРУ- 220	Система	3,028	7,351	0,894	3,028	Комут.апар. і шини
	Г 1-4	5,029	14,101	6,217	5,029	
	Г 5,6	3,369	9,312	3,975	3,065	
	Сума	11,425	30,764	11,086	11,122	
К-3 Г1 500 МВт	Система	38,648	101,099	34,269	38,648	Шини в осн. колі
	Г2-4	48,619	136,325	63,461	48,619	
	Г 5,6	9,478	26,201	12,034	9,478	
	Сума без Г1	96,745	263,624	109,764	96,745	
	Г1	78,991	220,146	102,863	75,831	шини до ВП
	Сума	175,735	483,771	212,627	172,575	
К-4 Г6 160 МВт	Система	14,174	37,077	9,157	14,174	шини в осн. колі
	Г 1-4	23,551	66,036	29,116	23,551	
	Г 5	7,890	21,810	9,311	7,732	
	Сума без Г6	45,614	124,922	47,584	45,456	
	Г6	31,990	88,794	37,933	27,511	шини до ВП
	Сума	77,604	213,717	85,517	72,968	
К-5 НН АТЗ 35 кВ	Система	6,546	17,125	3,405	6,546	Комут.апар
	Г 1-4	10,875	30,492	12,954	10,875	шини
	Г 5,6	7,284	20,136	8,177	7,139	
	Сума	24,705	67,754	24,537	24,560	
К-6 РУ ВП-6 кВ	С + Г1-6	13,801	35,712	7,731	13,801	Комут.апар
	Двигуни	13,833	32,275	5,604	6,772	
	Сума	27,635	67,987	13,335	20,573	шини
К-7 РУ ВП-6 кВ	С + Г1-6	16,277	42,119	9,118	16,277	Комут.апар
	Двигуни	13,833	32,275	5,604	6,772	
	Сума	30,110	74,393	14,722	23,049	шини

1.7 Визначення максимальних струмів приєднань та імпульсів квадратичного струму

ВРУ-500 кВ:

Максимальні струми:

$$I_{\max.W} = \frac{P_{\text{гр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi}; \quad (1.45)$$

$$I_{\max.БТ} = \frac{S_{\Gamma.\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot 0,95}; \quad (1.46)$$

$$I_{\max.АТЗ} = \frac{1,5 \cdot S_{\text{АТ.НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}. \quad (1.47)$$

$$I_{\max.W} = \frac{900 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 0,85} = 1223 \text{ (A)};$$

$$I_{\max.БТ1} = \frac{588 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 0,95} = 715 \text{ (A)};$$

$$I_{\max.АТЗ} = \frac{1,5 \cdot 3 \cdot 167 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500} = 868 \text{ (A)}.$$

Імпульс квадратичного струму:

$$B_K = I_{\text{по}}^2 (t_{\text{вим}} + T_a), \quad (1.48)$$

де $t_{\text{вим}}$ – час вимикання КЗ, с.

$$B_K = 13,846^2 (0,2 + 0,35) = 105,4 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

ВРУ-220 кВ:

$$I_{\max.W} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,85} = 618 \text{ (A)};$$

$$I_{\max .BT2} = \frac{188 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,95} = 519,3 \text{ (A)};$$

$$I_{\max .AT3} = \frac{1,5 \cdot 3 \cdot 167 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 1972 \text{ (A)};$$

$$I_{\max .TR} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 105 \text{ (A)}.$$

$$B_K = 11,425^2 (0,2 + 0,35) = 72 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

Коло генератора G_1 (500 МВт):

$$I_{\max .G} = \frac{I_{G.HOM}}{0,95}. \quad (1.49)$$

$$I_{\max .G} = \frac{17 \cdot 10^3}{0,95} = 17895 \text{ (A)};$$

$$I_{\max .ТВИ} = \frac{25500}{\sqrt{3} \cdot 20} = 736 \text{ (A)}.$$

Імпульс квадратичного струму [3]:

$$B_K = B_{K\Pi} + B_{Ka} = (B_{\Pi c} + B_{\Pi r} + B_{\Pi rc}) + B_{Ka} = (I_c^2 + B_{\Pi r}^* \cdot I_{\Pi, o, \Gamma}^2 + 2 \cdot I_c \cdot T^* \cdot I_{\Pi, o, \Gamma}) \cdot t_{\text{вим}} + \\ + (I_c^2 \cdot T_{a, c} + I_{\Pi, o, \Gamma}^2 \cdot T_{a, \Gamma} + 4 \cdot I_c \cdot I_{\Pi, o, \Gamma} / (1/T_{a, c} + 1/T_{a, \Gamma})), \quad (1.50)$$

де $t_{\text{вим}} = 4 \text{ с}$; $B_{\Pi r}^* = 0,3$; $T^* = 0,52$; $T_{a, \Gamma} = 0,34 \text{ с}$; $I_{\Pi, o, \Gamma} = 78,991 \text{ кА}$;

$I_c = 96,745 \text{ кА}$; $T_{a, c} = 0,35 \text{ с}$.

$$B_K = (96,745^2 + 0,3 \cdot 78,991^2 + 2 \cdot 96,745 \cdot 78,991 \cdot 0,52) \cdot 4 + \\ (96,745^2 \cdot 0,35 + 78,991^2 \cdot 0,478 + (4 \cdot 96,745 \cdot 78,991) / \\ / (1/0,35 + 1/0,34) = 87385 (\text{кА}^2 \cdot \text{с}).$$

Коло генератора G_6 (160 МВт):

$$I_{\max.G} = \frac{5,67 \cdot 10^3}{0,95} = 9079 \text{ (A)};$$

$$I_{\max.TBП} = \frac{8160}{\sqrt{3} \cdot 18} = 262 \text{ (A)}.$$

$$B_K = (45,614^2 + 0,3 \cdot 31,99^2 + 2 \cdot 45,614 \cdot 31,99 \cdot 0,52) \cdot 4 + (45,614^2 \cdot 0,35 + 31,99^2 \cdot 0,545 + (4 \cdot 45,614 \cdot 31,99) / (1/0,35 + 1/0,267)) = 17506,4 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

де $t_{\text{вим}} = 4 \text{ с}$; $B_{*ПГ} = 0,3$; $T^* = 0,52$; $T_{a,Г} = 0,267 \text{ с}$; $I_{П,О,Г} = 31,99 \text{ кА}$;

$I_c = 45,614 \text{ кА}$; $T_{a,c} = 0,35 \text{ с}$.

РУ ВП-6 кВ:

$$I_{\max.TBП} = \frac{32000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2} = 1540 \text{ (A)};$$

$$I_{\max.TR} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2} = 1925 \text{ (A)}.$$

$$B_K = I_{\text{пос}}^2 (t_{\text{вим}} + T_{\text{асх}}) + I_{\text{ноД}}^2 (0,5 T_{\text{Д}}' + T_{\text{асх}}) + 2 I_{\text{пос}} \cdot I_{\text{ноД}} (T_{\text{Д}}' + T_{\text{асх}}), \quad (1.51)$$

$$T_{\text{асх}} = \frac{T_{\text{ас}} I_{\text{пос}} + T_{\text{аД}} I_{\text{ноД}}}{I_{\text{пос}} + I_{\text{ноД}}};$$

$$T_{\text{асх}} = \frac{0,054 \cdot 16,277 + 0,04 \cdot 13,833}{16,277 + 13,833} = 0,048 \text{ (с)}.$$

$$B_K = 16,277^2 (0,3 + 0,048) + 13,833^2 (0,5 \cdot 0,07 + 0,048) + 2 \cdot 16,277 \cdot 13,833 (0,07 + 0,048) = 161 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

Сторона НН АТЗ 35 кВ:

$$I_{\max.TR} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35} = 660 \text{ (A)}.$$

$$B_K = 24,705^2 (0,2 + 0,35) = 336 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}.$$

1.8 Вибір комутаційної апаратури

Таблиця 1.15 – Вибір вимикачів та роз'єднувачів

ВРУ-500 кВ Розрахункові дані	Каталожні дані	
	ЗАТ2/DT-550 (Siemens)	РПД-500-1/3200У1
$U_{уст} = 500 \text{ кВ}$ $I_{max} = 1223 \text{ А}$ $I_{п,τ} = 13,641 \text{ кА}$ $i_{а,τ} = 16,036 \text{ кА}$ $i_y = 37,88 \text{ кА}$ $B_k = 105,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 500 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 1600 \text{ А}$ $I_{вим.ном} = 31,5 \text{ кА}$ $i_{а,ном} = \sqrt{2} \cdot B_{ном} \cdot I_{вим.ном} =$ $\sqrt{2} \cdot 0,5 \cdot 31,5 = 22,3 \text{ кА}$ $i_{дин} = 102 \text{ кА}$ $I^2_T \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 750 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 3200 \text{ А}$ $-$ $-$ $-$ $i_{дин} = 162 \text{ кА}$ $I^2_T \cdot t_T = 63^2 \cdot 2 = 7938 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
ВРУ-220 кВ	3АР1DT-245/ЕК (Siemens)	РНД3.1-220/2000У1
$U_{уст} = 220 \text{ кВ}$ $I_{max} = 1972 \text{ А}$ $I_{п,τ} = 11,122 \text{ кА}$ $i_{а,τ} = 11,086 \text{ кА}$ $I_{п,о} = 11,425 \text{ кА}$ $i_y = 30,764 \text{ кА}$ $B_k = 72 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $I_{вим.ном} = 31,5 \text{ кА}$ $i_{а,ном} = \sqrt{2} \cdot 0,35 \cdot 31,5 = 15,6 \text{ кА}$ $I_{дин} = 31,5 \text{ кА}$ $i_{дин} = 102 \text{ кА}$ $I^2_T \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 3 = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $-$ $-$ $-$ $i_{дин} = 100 \text{ кА}$ $I^2_T \cdot t_T = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
Сторона 35 кВ АТЗ:	ВБ4	РНД3.1-35/2000У1
$U_{уст} = 35 \text{ кВ}$ $I_{max} = 660 \text{ А}$ $I_{пτ} = 24,56 \text{ кА}$ $i_{аτ} = 24,537 \text{ кА}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 1600 \text{ А}$ $I_{вим.ном} = 31,5 \text{ кА}$ $i_{а,ном} = \sqrt{2} \cdot 0,25 \cdot 31,5 = 11,1 \text{ кА}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ}$ $I_{ном} = 2000 \text{ А}$ $-$ $-$
$\sqrt{2} I_{пτ} + i_{аτ} = 54,27 \text{ кА}$ $I_{по} = 24,705 \text{ кА}$ $i_y = 67,754 \text{ кА}$ $B_k = 336 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$\sqrt{2} I_{вим.ном} (1 + B_{ном}) =$ $55,7 \text{ кА}$ $I_{дин} = 31,5 \text{ кА}$ $i_{дин} = 128 \text{ кА}$ $I^2_T \cdot t_T = 2977 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$ $I^2_T \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 4 = 3969 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
РУ ВП 6 кВ:	ВРЗ-10	Комірка КРУ типу КУ10
$U_{уст} = 6 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_{max} = 1925 \text{ А}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$	$I_{ном} = 3150 \text{ А}$
$I_{п,τ} = 16,277 \text{ кА}$	$I_{вим.ном} = 40 \text{ кА}$	
$i_{а,τ} = 9,118 \text{ кА}$	$i_{а,ном} = \sqrt{2} \cdot 0,23 \cdot 40 = 12,97 \text{ кА}$	
$I_{п,о} = 16,277 \text{ кА}$	$I_{дин} = 40 \text{ кА}$	
$i_y = 42,119 \text{ кА}$	$i_{дин} = 102 \text{ кА}$	
$B_k = 161 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I^2_T \cdot t_T = 31,5^2 \cdot 4 = 3969 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	

1.9 Вибір струмоведучих частин

ВРУ 500 кВ

а) Збірні шини ВРУ-500 кВ

$$I_{\max} = 1223 \text{ (A)};$$

$$I_{п,о} = 13,846 \text{ кА} < 20 \text{ (кА)};$$

$$i_y = 37,88 \text{ кА} < 50 \text{ (кА)}.$$

Приймаємо три проводи марки АС 300/204:

$$d = 29,2 \text{ (мм)}; I_{\text{доп}} = 700 \text{ (А)}; D = 600 \text{ (см)}; a = 40 \text{ (см)}.$$

Фази розташовані горизонтально, середня геометрична відстань між проводами фаз:

$$D_{\text{ср}} = 1,26 \cdot D; \quad (1.52)$$

$$D_{\text{ср}} = 1,26 \cdot 600 = 756 \text{ см.}$$

Перевірка за максимальним струмом:

$$I_{\max} = 1224 \text{ (А)} < I_{\text{доп}} = 3 \cdot 700 = 2100 \text{ (А)}.$$

Перевірка на коронування [2]:

$$1,07 \cdot E \leq 0,9 E_0, \quad (1.53)$$

де E_0 – початкова критична напруженість електричного поля, кВ/см;

E – напруженість поля біля поверхні проводів, кВ/см.

$$E_0 = 30,3 \cdot m \cdot (1 + 0,299/\sqrt{r_0}), \quad (1.54)$$

де $m = 0,82$ – коефіцієнт жорсткуватості проводів;

r_0 – радіус проводу, см.

$$E_0 = 30,3 \cdot 0,82 \cdot (1 + 0,299/\sqrt{1,46}) = 31 \text{ (кВ/см)}.$$

$$E = K \cdot 0,354 \cdot U_{\max} / (n \cdot r_0 \cdot \lg(D_{\text{cp}} / r_{\text{ек}})), \quad (1.55)$$

де K – коефіцієнт, який враховує кількість проводів в фазі;

$U_{\max}$ – максимальна допустима напруга установки, кВ;

$r_{\text{ек}}$ – еквівалентний радіус розщеплених проводів, см;

n – кількість проводів в фазі, шт.

Для $n=3$:

$$K = 1 + 2\sqrt{3} \cdot r_0 / a ;$$

$$r_{\text{ек}} = \sqrt[3]{r_0 \cdot a^2},$$

де $a = 40$ см – відстань між проводами в розщепленій фазі.

$$K = 1 + 2\sqrt{3} \cdot 1,46 / 40 = 1,126;$$

$$r_{\text{ек}} = \sqrt[3]{1,46 \cdot 40^2} = 13,27 \text{ (см)}.$$

$$E = 1,126 \cdot 0,354 \cdot 525 / (3 \cdot 1,46 \cdot \lg(756 / 13,27)) = 27,1 \text{ (кВ/см)}.$$

Умова перевірки:

$$1,07 \cdot 27,1 = 29 \text{ кВ/см} > 0,9 \cdot 31 = 27,9 \text{ (кВ/см)}.$$

Умова не виконується.

Встановлюємо чотири проводи марки АС 300/204:

$$K = 1 + 3\sqrt{2} \cdot 1,46 / 40 = 1,154;$$

$$r_{\text{ек}} = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot 1,46 \cdot 40^3} = 19,05 \text{ (см)}.$$

$$E = 1,154 \cdot 0,354 \cdot 525 / (4 \cdot 1,46 \cdot \lg(756 / 19,05)) = 23 \text{ (кВ/см)}.$$

Умова перевірки:

$$1,07 \cdot 23 = 24,6 \text{ кВ/см} < 27,9 \text{ (кВ/см)}.$$

б) відгалуження до БТ1:

Економічний переріз

$$q_{\text{ек}} = \frac{I_{\text{норм}}}{j_{\text{ек}}}, \quad (1.55)$$

де $j_{ек}$ – економічна густина струму, А/мм²;

$I_{норм}$ – струм нормального режиму, А.

$$I_{норм} = \frac{588 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500} = 679 \text{ А};$$

$$q_{ек} = \frac{679}{1} = 679 \text{ А}.$$

За умовою відсутності корони обираємо чотири проводи марки АС 300/204.

в) відгалуження до АТЗ:

$$I_{норм} = \frac{868}{1,5} = 578,5 \text{ А};$$

$$q_{ек} = \frac{578,5}{1} = 578,5 \text{ А}.$$

Встановлюємо чотири проводи марки АС 300/204.

ВРУ-220 кВ:

а) збірні шини ВРУ – 220 кВ

$$I_{max} = 1972 \text{ (А)};$$

$$I_{п,о} = 11,425 \text{ кА} < 20 \text{ (кА)};$$

$$i_y = 30,764 \text{ кА} < 50 \text{ (кА)}.$$

Приймаємо два проводи марки АС 550/71:

$$d = 32,4 \text{ (мм)}; I_{доп} = 1000 \text{ (А)}; D = 400 \text{ (см)}.$$

$$D_{ср} = 1,26 \cdot 400 = 504 \text{ (см)};$$

$$I_{max} = 1972 \text{ (А)} < I_{доп} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ (А)};$$

$$E_o = 30,3 \cdot 0,82 \cdot (1 + 0,299/\sqrt{1,62}) = 30,7 \text{ (кВ/см)};$$

$$E = 0,354 \cdot 242 / (1,62 \cdot \lg(504/1,62)) = 21,2 \text{ (кВ/см)}.$$

$$1,07 \cdot 21,2 = 22,7 \text{ кВ/см} < 0,9 \cdot 30,7 = 27,6 \text{ (кВ/см)}.$$

Умова виконується.

б) відгалуження до БТ₂:

$$q_{ек} = \frac{519,3 \cdot 0,95}{1} = 493 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Встановлюємо два проводи марки АС 550/71.

в) відгалуження до АТЗ:

$$q_{ек} = \frac{1972}{1 \cdot 1,5} = 1314,7 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Встановлюємо два проводи марки АС 700/86: $I_{доп} = 1180 \text{ (А)}$; $d = 36,2 \text{ (мм)}$.

Сторона 35 кВ АТЗ

$$I_{max} = 660 \text{ (А)};$$

$$I_{п,о} = 24,705 \text{ (кА)} > 20 \text{ (кА)};$$

$$i_y = 67,754 \text{ (кА)} > 50 \text{ (кА)}.$$

Приймаємо провід марки АС 300/66:

$d = 24,5 \text{ (мм)}$; $I_{доп} = 680 \text{ (А)}$; $D = 150 \text{ (см)}$; $a_{доп} = 0,30 \text{ (м)}$; $m_1 = 1,313 \text{ (кг/м)}$.

$$I_{max} = 660 \text{ (А)} < I_{доп} = 680 \text{ (А)}.$$

Перевірка на схрещування проводів:

- зусилля від тривалого протікання струму двофазного КЗ:

$$f = 0,15 \cdot I_{п,о}^{(3)2} / D;$$

$$f = 0,15 \cdot 24,705^2 / 1,5 = 72,7 \text{ (Н/м)};$$

- сила тяжіння 1м струмопроводу:

$$g = 9,8 \cdot m_1;$$

$$g = 9,8 \cdot 1,313 = 12,9 \text{ (Н/м)}.$$

- визначаємо співвідношення: $\sqrt{h} / t_{ек}$ та f / g ;

де $h = 2,5$ – монтажна стріла провисання проводу, м;

$t_{ек}$ – еквівалентний за імпульсом час дії диференціального захисту, с;

$$t_{ек} = t_3 + 0,05 = 0,15 \text{ (с)};$$

$$\sqrt{h} / t_{ек} = \sqrt{2,5} / 0,15 = 10,5;$$

$$f / g = 72,7 / 12,9 = 5,6.$$

- визначимо відхилення проводу (рисунок 1.1) $b/h = 0,6$;

$$b = 2,5 \cdot 0,6 = 1,5 \text{ (м)}.$$

- допустиме відхилення фази:

$$b_{\text{доп}} = (D-d-a_{\text{доп}})/2 ;$$

де $a_{\text{доп}} = 3,5$ м- найменша допустима відстань між сусідніми фазами в момент їх найбільшого зближення, м;

d – діаметр струмопроводу, м.

$$b_{\text{доп}} = (1,5-0,0245-0,3)/2 = 0,59 \text{ м} < b = 1,5 \text{ (м)}.$$

Встановлюємо в прогоні додаткову опору та збільшуємо відстань між фазами: $D = 2$ м.

Генератор ТГВ-500-2УЗ.

Встановлюємо екранований генераторний струмопровід:

а) в основному колі типу ТЕКНЕ-20/20000-560У1:

$$U_{\text{уст.}} = 20 \text{ (кВ)} \leq U_{\text{ном}} = 20 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\text{max}} = 17895 \text{ (А)} \leq I_{\text{ном}} = 20000 \text{ (А)};$$

$$i_y = 263,624 \text{ (кА)} \leq i_{\text{дин.}} = 560 \text{ (кА)}.$$

б) на відгалуженні до ТВП типу ТЕКНЕ-20/20000-750У1:

$$U_{\text{уст.}} = 20 \text{ (кВ)} \leq U_{\text{ном}} = 20 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\text{max}} = 736 \text{ (А)} \leq I_{\text{ном}} = 20000 \text{ (А)};$$

$$i_y = 483,771 \text{ (кА)} \leq i_{\text{дин.}} = 300 \text{ (кА)}.$$

Генератор ТВВ-160-2УЗ.

Встановлюємо екранований генераторний струмопровід:

а) в основному полі типу ТЕКНЕ-20/11200-300У1:

$$U_{\text{уст.}} = 18 \text{ (кВ)} \leq U_{\text{ном}} = 20 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\text{max}} = 5968,4 \text{ (А)} \leq I_{\text{ном}} = 11200 \text{ (А)};$$

$$i_y = 124,922 \text{ (кА)} \leq i_{\text{дин.}} = 300 \text{ (кА)}.$$

б) на відгалуженні до ТВП типу ТЕКНЕ-20/1600-560У1:

$$U_{\text{уст.}} = 18 \text{ (кВ)} \leq U_{\text{ном}} = 20 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\max} = 262 \text{ (A)} \leq I_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ (A)};$$

$$i_y = 213,717 \text{ (кА)} \leq i_{\text{дин.}} = 560 \text{ (кА)}.$$

РУ ВП-6 кВ:

Встановлюємо екранований генераторний струмопровід типу ТЗК-6-2000-81 [3]:

$$U_{\text{уст.}} = 6 \text{ (кВ)} \leq U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\max} = 1540 \text{ (A)} \leq I_{\text{НОМ}} = 2000 \text{ (A)};$$

$$i_y = 74,393 \text{ (кА)} \leq i_{\text{дин.}} = 81 \text{ (кА)}.$$

Обираємо кабель до електродвигуна циркуляційного насосу типу ВАН 143/51-10У3 [3]: $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$; $P_{\text{НОМ}} = 1250 \text{ Н}$; $I_{\text{НОМ}} = 149 \text{ А}$; $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,827$; $n_{\text{НОМ}} = 593 \text{ об/хв}$; $K_{\text{п}} = 4,2$.

Кабель прокладається у вологому приміщенні в каналі: $B_{\text{к}} = 161 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$;

$$T_{\max} = 3800 \text{ (год)}; V_0 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Вибираємо кабель марки ААШВ, 6 кВ, трьохжильний.

Економічний переріз:

$$q_{\text{ек}} = 149/1,4 = 106,4 \text{ (мм}^2\text{.)}$$

Приймаємо кабель $3 \times 120 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп.НОМ}} = 190 \text{ А}$; $K_{\text{п}} = 0,87$; $I_{\text{доп}} = 0,87 \cdot 190 = 165,3 \text{ А} > 149 \text{ А}$.

Перевіряємо кабель на термічну стійкість:

$$q_{\min} = \frac{\sqrt{161 \cdot 10^6}}{98} = 98 = 130,2 \text{ мм}^2 > q = 120 \text{ (мм}^2\text{.)}$$

Умова не виконується. Збільшуємо переріз кабелю, приймаємо кабель $3 \times 150 \text{ мм}^2$.

1.10 Вибір вимірювальних трансформаторів

Вибираємо вимірювальні трансформатори струму та напруги для ЛЕП-500 кВ.

Таблиця 1.16 – Розрахункові та каталожні дані трансформатора струму ТВ-500

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{\text{уст}} = 500 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 500 \text{ кВ}$
$I_{\text{мах}} = 1223 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 1500 \text{ А}$
$i_y = 37,88 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 50 \text{ кА}$
$B_k = 105,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_T^2 \cdot t_T = 50^2 \cdot 3 = 7500 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$r^2 = 8,64 \text{ Ом}$	$r_{\text{ном}}^2 = 20 \text{ Ом}$

Примітки: а) варіант виконання вторинних обмоток:

0,2/10Р;

б) схема з'єднання обмоток: повна зірка;

в) розрахункова довжина з'єднувальних проводів:

$l_{\text{розр}} = 175 \text{ (м)}$;

г) $I_{2\text{ном}} = 1 \text{ (А)}$.

Перевіримо ТС за вторинним навантаженням (таблиця 1.17).

Таблиця 1.17 – Вторинне навантаження ТС

Прилад	Тип	Навантаження, В·А, фаза		
		А	В	С
Амперметр	Э-377	0,1	0,1	0,1
Ватметр	Д-305	0,5	—	0,5
Варметр	Д-305	0,5	—	0,5
Датчик активної потужності	Е-829	1,0	—	1,0
Датчик реактивної потужності	Е-830	1,0	—	1,0
Лічильник активної енергії	И-680	2,5	—	2,5
Разом:		6,5	0,1	6,5

Загальний опір приладів:

$$r_{\text{прил}} = S_{\text{прил}} / I^2_2; \quad (1.56)$$

$$r_{\text{прил}} = 6,5 / 1^2 = 6,5 (\text{Ом}).$$

Допустимий опір проводів:

$$r_{\text{пр}} = r_{2\text{ном}} - r_{\text{прил}} - r_{\text{к}}; \quad (1.57)$$

$$r_{\text{пр}} = 20 - 6,5 - 0,1 = 13,4 (\text{Ом}).$$

Розрахунковий переріз проводів:

$$q_{\text{розр}} = p \cdot l_{\text{розр}} / r_{\text{пр}}; \quad (1.58)$$

$$q_{\text{розр}} = 0,0175 \cdot 175 / 13,4 = 0,23 (\text{мм}^2).$$

За умовою механічної міцності приймаємо контрольний кабель марки КРВГ з жилами перерізом $q = 1,5 (\text{мм}^2)$.

Вторинне навантаження:

$$r_2 = 6,5 + 0,1 + (0,0175 \cdot 175) / 1,5 = 8,64 (\text{Ом}) < 20 (\text{Ом}).$$

Встановлюємо трансформатор напруги (ТН) типу НДЕ-500-72У1:

$$U_{1\text{ном}} = 500000 / \sqrt{3} (\text{кВ});$$

$$U_{2\text{ном}} = 100\sqrt{3} (\text{В});$$

$$U_{3\text{дод}} = 100 (\text{В});$$

$$S_{2\text{ном}0,5} = 300 (\text{В} \cdot \text{А}).$$

Таблиця 1.18 – Вторинне навантаження НДЕ-500-72У1

Прилад	Тип	$S_{обм},$ В·А	$n_{обм},$ шт	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$n_{прил},$ шт	Загальна потужність	
							P, Вт	Q, Вар
Ватметр	Д-305	2	2	1	0	1	4,0	–
Варметр	Д-305	2	2	1	0	1	4,0	–
Фіксуєчий прилад	ФИП	3	–	1	0	1	3,0	–
Датчик активної потужності	Е-829	10	–	1	0	1	10	–
Датчик реактивної потужності	Е-830	10	–	1	0	1	10	–
Лічильник активної енергії	И-680	2 Вт	2	0,38	0,925	1	4	9,7
Разом:							35	9,7

Вторинне навантаження:

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{Q^2 + P^2} = \sqrt{35^2 + 9,7^2} = 36,3 \text{ (В} \cdot \text{А)} < S_{2\text{доп}} = 3 \cdot 300 = 900 \text{ (В} \cdot \text{А)}.$$

Для з'єднання ТН з приладами використовуємо контрольний кабель КРВГ з перерізом жил $q = 1,5 \text{ (мм}^2\text{)}$.

1.11 Вибір акумуляторної батареї

Розрахунок навантаження акумуляторної батареї для генератора ТВВ-160 зведений в таблиці 1.19. Встановлюємо одну АБ на два блоки.

Таблиця 1.19 – Навантаження акумуляторної батареї генератора ТВВ-160

Електроприймач	К-ть	$P_{\text{ном}},$ кВт	$I_{\text{ном}},$ А	$I_{\text{розр}},$ А	$I_{\text{пуск}},$ А	$I_{\text{ав}},$ А	$I_{\text{т}},$ А
Постійне навантаження	—	—	—	30	—	30	30
Аварійне освітлення	—	—	—	200	—	200	—
Перетворювальний агрегат оперативного зв'язку	1	7,2	38	30	100	30	30
Електродвигун аварійного маслососу ущільнень генератора	2	25	128	120	320	240	640
Електродвигун аварійного маслососу змазки турбін	2	14	73,5	73	146	146	292
Разом						646	992

Виходячи з тривалості аварійного навантаження визначимо типовий номер батареї:

$$N = 1,05 \cdot I_{\text{ав}} / j, \quad (1.59)$$

де 1,05 – коефіцієнт, що враховує старіння акумуляторів;

$I_{\text{ав}}$ – струм півгодинного аварійного розряду, А;

$j = 25 \text{ А/Н}$ [2] – допустиме навантаження аварійного розряду, приведене до першого номера акумуляторів, в залежності від температури електроліту.

$$N = 1,05 \cdot 646 / 25 = 27.$$

Перевіряємо по струму короткочасного аварійного навантаження:

$$N \geq I_{\text{т}} / 46, \quad (1.60)$$

$$N = 992 / 46 = 21,6.$$

Приймаємо найближчий найбільший типовий номер [2]: $N = 28$.

Перевіряємо по допустимій напрузі в умовах аварійного короткочасного навантаження:

$$j_{\pi} = I_T / N, \quad (1.61)$$

де j – визначається по кривим [2] для основних елементів з умови забезпечення мінімально допустимої напруги на приводі вимикача 85% $U_{\text{ном}}$, з врахуванням падіння напруги в кабелі 5% $U_{\text{ном}}$.

$$j = 38 \text{ A/N} > j_{\pi} = \frac{992}{28} = 35,4 \text{ A/N}.$$

Остаточно приймаємо для встановлення акумуляторну батарею з типовим номером 28 типу «Varta».

Підзарядний пристрій (ПЗП) вибираємо по розрахунковим значенням струму і напруги в нормальному режимі. Струм підзаряду приймаємо рівним $0,15 \cdot N$ [2]; тоді розрахунковий струм ПЗП основних елементів батареї:

$$I_{\text{ПЗП}} = I_{\text{пост}} + 0,15 \cdot N, \quad (1.62)$$

де $I_{\text{пост}}$ – струм постійно включеного навантаження (таблиця 2.19).

$$I_{\text{ПЗП}} = 30 + 0,15 \cdot 28 = 34,2 \text{ (A)}.$$

Розрахункова напруга підзарядного пристрою

$$U_{\text{ПЗП}} = U_{\text{пз}} \cdot n_0;$$

$$U_{\text{ПЗП}} = 2,15 \cdot 108 = 232,2 \text{ (В)}.$$

Вибираємо ПЗП типу ВАЗП-380/260-40/80.

Додаткові елементи в нормальному режимі навантаження не несуть. Тому розрахунковий струм і напруга підзарядного автоматичного пристрою додаткових елементів

$$I_{\text{ПЗП дод}} = 0,05 \cdot N,$$

$$I_{\text{ПЗП дод}} = 0,05 \cdot 28 = 1,4 \text{ (A)},$$

$$U_{\text{ПЗП дод}} = U_{\text{пз}} \cdot n_{\text{дод}},$$

$$U_{\text{ПЗП дод}} = 2,15 \cdot 22 = 47,3 \text{ (В)}.$$

Вибираємо автоматичний ПЗП типу АРН-3.

Розрахунковий струм і напруга зарядного пристрою:

$$I_{\text{зп}} = 30 + 5 \cdot 28 = 170 \text{ (A)},$$

$$U_{\text{зп}} = U_3 \cdot n = 2,75 \cdot 130 = 357,5 \text{ (В)}.$$

Вибираємо зарядний агрегат типу ТППС-800.

1.12 Вибір засобів обмеження перенапруг, високочастотних загороджувачів та шунтових реакторів

Для захисту обладнання від атмосферних та комутаційних перенапруг встановлюємо розрядники та обмежувачі перенапруг [4]:

- | | |
|---|--------------|
| 1. ЛЕП-500 кВ, сторона ВН БТ1 та АТЗ | ОПН-500УХЛ1; |
| 2. ЛЕП – 220 кВ, сторона ВН БТ2 та ТР2, сторона Н АТЗ | ОПН-220 УХЛ1 |
| 3. Нейтраль БТ2 | ОПН-110 УХЛ1 |
| 4. Сторона НН БТ1 | ОПН-20 УХЛ3 |
| 5. Сторона НН БТ2 | ОПН-18 УХЛ3 |
| 6. Сторона НН АТЗ | ОПН-35 УХЛ1 |
| 7. Сторона НН ТВП, ТР1 та ТР2 | ОПН-6УХЛ3 |

Для забезпечення нормальної роботи релейного захисту, автоматики та зв'язку встановлюємо на ЛЕП високочастотні загороджувачі:

- | | |
|---------------|------------------|
| а) ЛЕП-500 кВ | ВЗ-1250-0,5 У1 |
| б) ЛЕП-220 кВ | ВЗ – 630 -0,5 У1 |

Для обмеження перенапруг на ЛЕП-500 кВ в режимі холостого ходу та малих навантажень встановлюємо шунтовий реактор типу РОДЦ-60000/500 У1.

1.13 Розрахунок грозозахисту ВРУ-500 кВ

Для ВРУ-500 кВ приймаємо однорядну установку вимикачів. Вихідні дані для розрахунку [4]:

а) висота блискавковідводів: $h = 43$ (м);

б) розрахункова висота, для якої визначаються зони захисту: $h_x = 28$ (м).

$$2/3h = 2/3 \cdot 43 = 28,7 \text{ (м)} > h_x = 28 \text{ (м)}.$$

Радіус та ширина зони захисту [3]:

$$\left. \begin{aligned} r_x &= 1,5 \cdot (h - 1,25 \cdot h_x); \\ B_x &= 3 \cdot (h_0 - 1,25 \cdot h_x). \end{aligned} \right\} \quad (1.63)$$

Де

$$h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 + 0,25L^2}, \quad (1.64)$$

де L – відстань між сусідніми блискавковідводами, м.

На рисунку 2.19 наведено вид на зону блискавковідводів ВРУ-500 кВ.

Таблиця 2.20 – Дані для побудови захисту блискавковідводів ВРУ-500 кВ

Пари блискавковідводів	L , м	h_0 , м	B_x , м	r_x , м
1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, 12-13, 14-15....25-26	30	42,13	21,39	12,0
1-14, 2-15, 3-16, 4-17, 5-18, 6-19, 7-20, 8-21, 9-22, 10-23, 11-24, 12-25, 13-26	80	36,94	5,82	12,0
1-15, 2-16, 2-16, 3-15, 3-17, 4-16, 4-18, 5-17, 5-19, 6-18, 6-20, 7-19, 7-19, 8-20, 8-22, 9-21, 9-23, 10-22, 10-24, 11-23, 11-25, 12-24, 12-26, 13-25	85,44	36,11	3,33	12,0

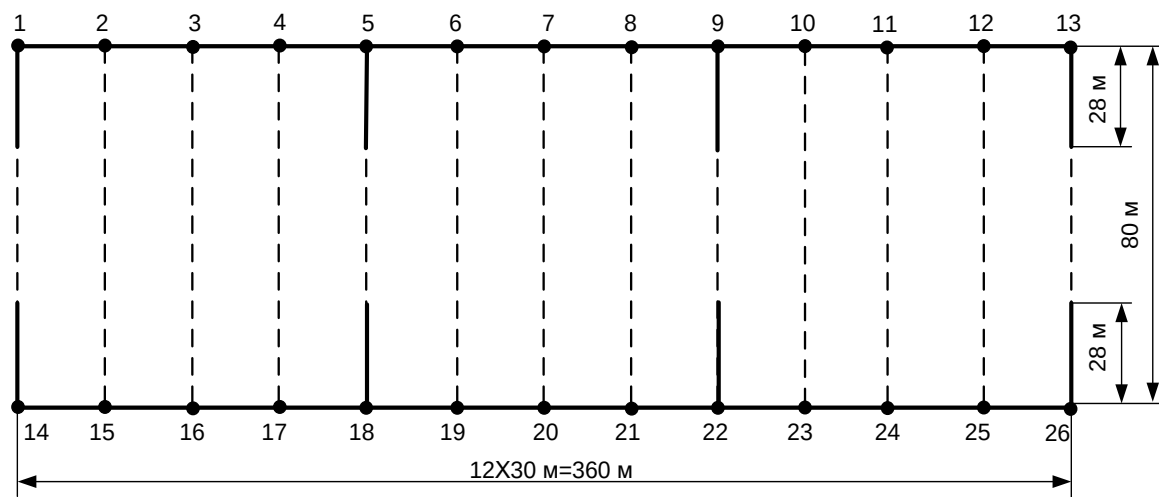
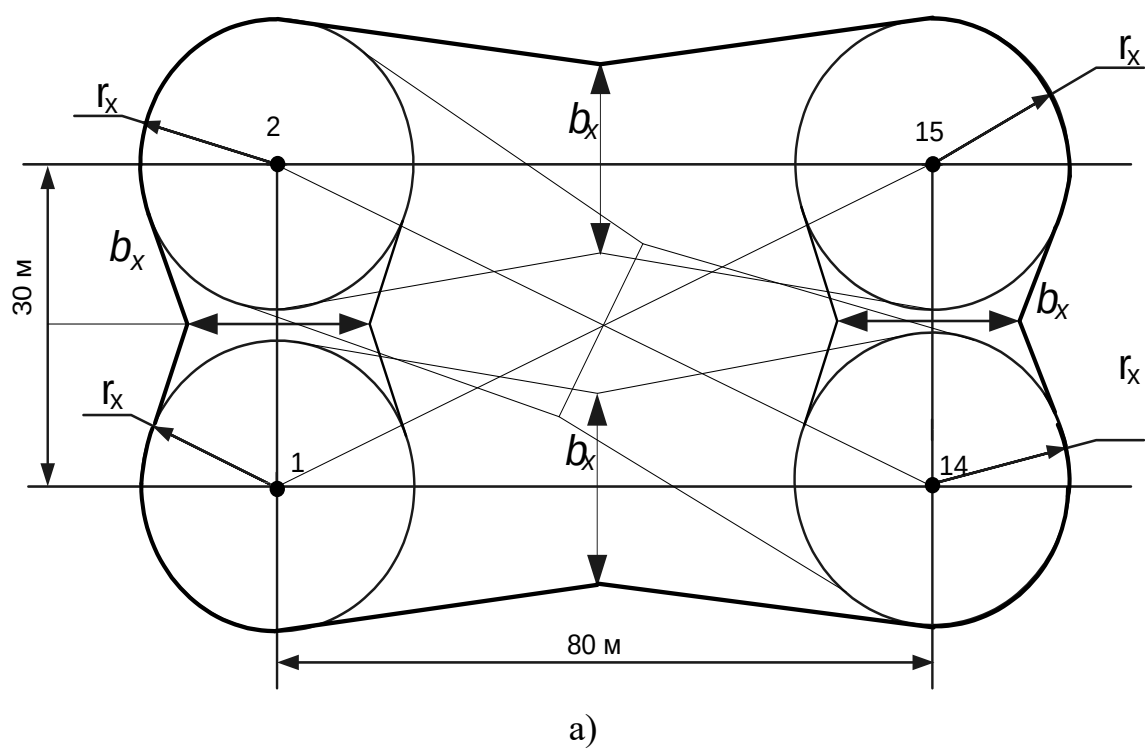


Рисунок 1.18 – Схема розташування блискавковідводів на ВРУ-500 кВ



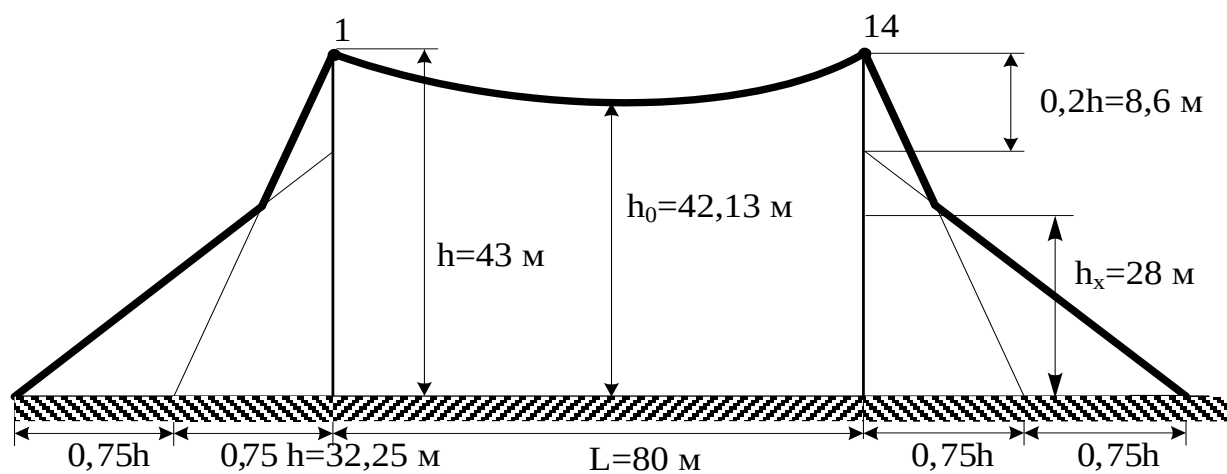


Рисунок 1.19 – Вид на зону блискавковідводів зверху (а) та збоку (б)

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ГОЛОВНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

2.1 Поняття про частковий розряд

Поняття часткового розряду (ч. р.) в ізоляції охоплює місцевий розряд на поверхні або всередині ізоляції у вигляді корони, ковзний розряд або пробую окремих елементів ізоляції, шунтуюча частина ізоляції між електродами, що знаходяться під різними потенціалами.

Ч. р. в ізоляції виникають в місцях зі зниженою електричною міцністю (наприклад, в прошарках які просочені рідиною або в газових включеннях в товщі діелектрика). Надалі елемент діелектрика зі зниженою електричною міцністю, що бере участь в ч. р., буде називатися «включенням».

При розгляді ч. р. еквівалентна схема діелектрика ємністю C_x може бути представлена трьома ємностями (Рисунок 2.1): C_b - ємністю елемента діелектрика, який бере участь в ч. р. (ємність включення); C_d - ємністю елемента діелектрика, включеного послідовно з першим; C_a - ємністю решти діелектрика, позбавленої включень(2.1):

$$C_x = C_a + \frac{C_b C_d}{C_b + C_d} \quad (2.1)$$

При цьому виникнення ч. р. відбудеться тоді, коли напруга на включенні (Рисунок 2.1, ємність C_b) досягне пробивної значення $U_{в.з.}$ - напруги запалювання розряду у включенні.

Так, наприклад, при включених в формі прошарку, витягнутою поперек силових ліній поля, напруженість у включенні E_b пов'язана з напруженістю в іншій частині діелектрика E_d співвідношенням(2.2):

$$\frac{E_b}{E_d} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_b} \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_{\text{в}}$ - діелектрична проникність включення; $\varepsilon_{\text{д}}$ - діелектрична проникність діелектрика.

У разі газоподібних включень напруженість у включенні перевищує напруженість в діелектрику, так як $\varepsilon_{\text{д}} > \varepsilon_{\text{в}}$, то $E_{\text{в}} > E_{\text{д}}$.

Співвідношення між напруженістю у включенні і середньою напруженістю буде залежати від співвідношення між товщиною діелектрика і включення. Якщо ввести значення: $d_{\text{д}}$ - товщина діелектрика, розташованого послідовно з включенням (Рисунок 2.1); $d_{\text{в}}$ - товщина включення; U - напруга на електродах зразка, то для еквівалентної схеми Рисунок 1.1 маємо(2.3):

$$E_{\text{в}} = \frac{UC_{\text{д}}}{d_{\text{в}}(C_{\text{д}}+C_{\text{в}})} = \frac{U\varepsilon_{\text{д}}/d_{\text{д}}}{d_{\text{в}}(\frac{\varepsilon_{\text{д}}}{d_{\text{д}}} + \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{d_{\text{в}}})} = \frac{U\varepsilon_{\text{д}}}{\varepsilon_{\text{в}}d_{\text{д}} + \varepsilon_{\text{д}}d_{\text{в}}} \quad (2.3)$$

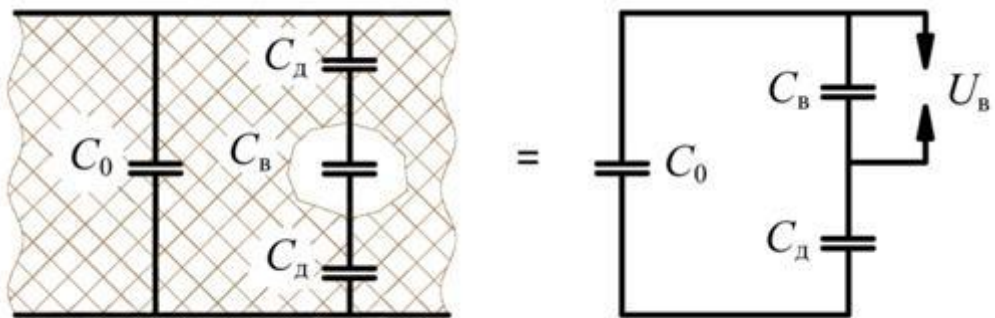


Рисунок 2.1 Еквівалентна схема при розгляді ч. р. в діелектрику

$C_{\text{в}}$ - ємність елемента діелектрика, який бере участь в ч. р. (ємність включення);

$C_{\text{д}}$ - ємність частини діелектрика, розташованого послідовно з включенням;

$C_{\text{а}}$ - ємність решти діелектрика.

і відношення $E_{\text{в}}$ до середньої напруженості $E_{\text{ср}} = \frac{U}{(d_{\text{д}}+d_{\text{в}})}$ дорівнює:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{ср}}} = \frac{1 + d_{\text{в}}/d_{\text{д}}}{(\varepsilon_{\text{в}}/\varepsilon_{\text{д}}) + (d_{\text{в}}/d_{\text{д}})} \quad (2.4)$$

Таким чином, відношення E_v/E_{cp} залежить від відношення d_v/d_d . Якщо $d_v/d_d \ll 1$, то $E_v/E_{cp} = \varepsilon_d/\varepsilon_v$.

Для сферичного або еліпсоїдального включення(2.5):

$$E_v/E_d = 3\varepsilon_d/(\varepsilon_v + 2\varepsilon_d). \quad (2.5)$$

Електрична міцність газу при включенні мало відрізняється від електричної міцності газу між металевими електродами. Якщо поле у включенні однорідне (плоскі включення, витягнуті поперек поля, або сферичні включення), то пробивна напруга пов'язана з розмірами включення (його товщиною) і тиском газу при включенні законом Пашена. Залежності пробивної напруги $U_{пр}$ від тиску газу у включенні p і товщини включення d_v для різних газів наведені на Рисунок 2.2. При розмірах включення порядку десятків мікрометрів і тиску, близькому до атмосферного, пробивна напруга лежить близько мінімуму кривої Пашена, слабо змінюється при зміні розмірів включення і становить приблизно 250-300 В.

При включених у вигляді прошарків рідкого діелектрика для визначення напруженості у включенні залишаються в силі приведені вище співвідношення (2-2) - (2-5). Пробивна напруженість рідкого діелектрика також істотно збільшується зі зменшенням товщини включення. Як приклад на Рисунок 2-3 приведена залежність пробивної напруженості нафтового масла від товщини зазору d_m .

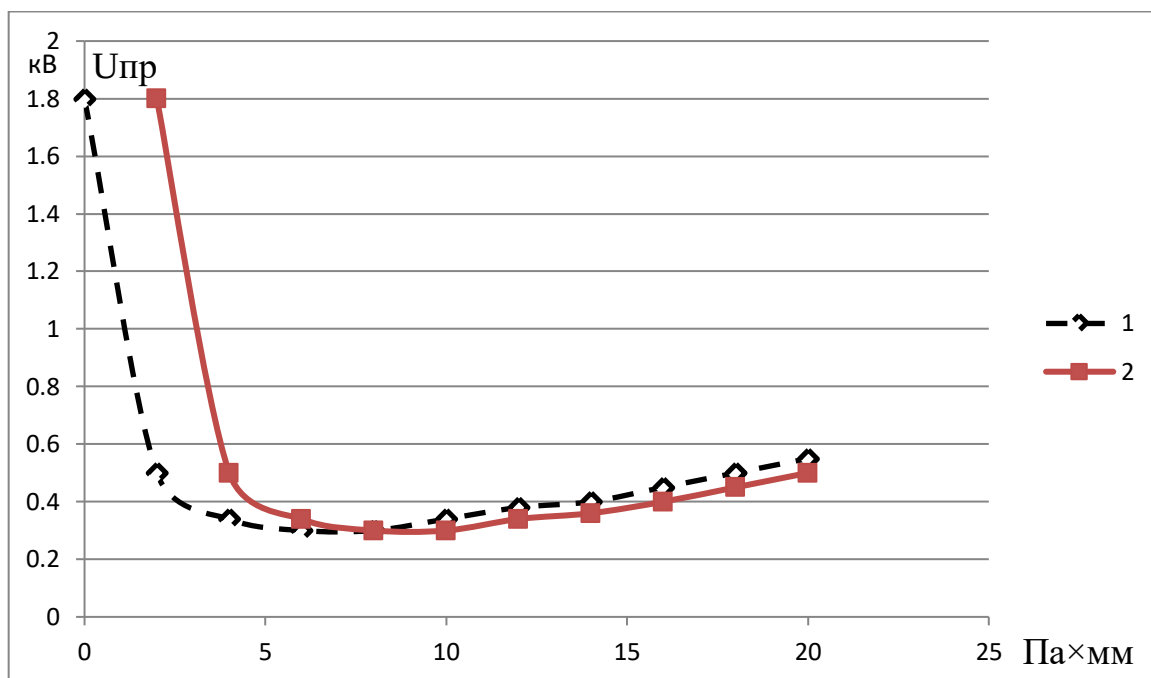


Рисунок 2.2 Пробивна напруга газів в залежності від тиску і відстанню між електродами в рівномірному полі 1- повітря; 2- водень.

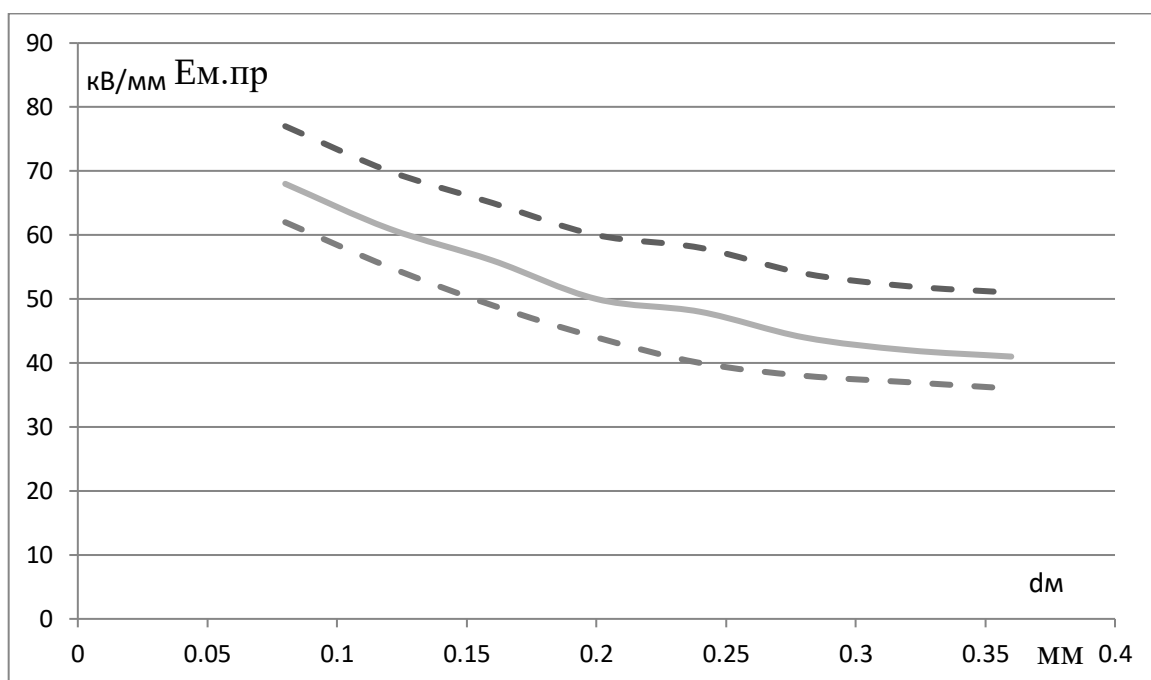


Рисунок 2.3 Залежність пробивної напруженості масляної прослойки від товщини для рівномірного поля в зазорі, що прилягає до електрода (штриховий лінією показана зона розкиду пробивних напруженостей).

При пробі включення (ємності C_B) іони, що утворюються в процесі розряду, заряджають поверхню включення і створюють поле, протилежне по напрямку основному полю. Після розряду ємності включення C_B в більшості випадків не виникає велика щільність струму, необхідна для підтримки стійкого розряду, і він гасне. Створення напівпровідникового шару на поверхні включення також не може привести до підтримки розряду внаслідок незначної місткості включення. При пробі напруга на включенні падає не до нуля, а до певного значення $U_{ВП}$, при якому розряд гасне. Напруга згасання при розмірах газового включення або масляної плівки порядку 10-100 мкм менше відповідного пробивної напруги і може бути в межах.

$$U_{ВП} \approx (0.1 \div 0.9)U_{ВЗ} \quad (2.6)$$

Напруга на електродах об'єкта, відповідне виникнення ч. р. скорочено називається напругою ч. р. $U_{чр}$. Зв'язок між $U_{чр}$ і $U_{ВЗ}$ може бути встановлений з розгляду еквівалентної схеми рисунок 2.1:

$$U_{чр} = U_{ВЗ} \frac{C_D + C_B}{C_B} \quad (2.7)$$

Тривалість процесу пробою включення (тривалість ч. р.) в більшості випадків дуже мала — близько $(3 - 10) \times 10^{-9}$ с. Лише при потужних критичних ч. р., Що представляють собою розгалужені ковзаючі розряди або пробі великих (близько 1 см і більше) прошарків рідких діелектриків, тривалість ч. р. може бути більше (до $10^{-7} - 10^{-6}$ с).

2.2 Основні характеристики часткових розрядів

Кожен з одиничних ч. р. супроводжується проходженням через включення певного заряду q і призводить до зміни напруги на зовнішніх електродах всього зразка на ΔU_x .

Якщо $C_a \gg C_b$ і $C_a \gg C_d$, то заряд q проходить через включення в момент виникнення ч. р., дорівнює (2.8):

$$q = (C_b + C_d)(U_{вз} - U_{вп}) = (C_b + C_d)\Delta U_b. \quad (2.8)$$

Практично заряд q не може бути виміряний безпосередньо, так як його проходження пов'язано з процесами всередині діелектрика випробуваного об'єкта.

У момент виникнення ч. р. можна вважати, що заряд на електродах випробуваного об'єкта не змінюється, так як ємність об'єкта відокремлена від решти ємності ланцюга індуктивністю з'єднувальних проводів (шин). Тому зміна напруги ΔU_x відбувається за рахунок збільшення ємності об'єкта при виникненні ч. р. (шунтування ємності C_b в еквівалентній схемі Рисунок 2.1).

Однак для зручності подальших міркувань можна уявити, що зміна напруги на об'єкті відбувається внаслідок фіктивної зміни заряду $q_{чр}$ на електродах об'єкта незмінною ємності C_x , причому $\Delta U_x = q_{чр}/C_x$.

Величина $q_{чр}$ називається уявним зарядом ч. р. Таким чином, уявний заряд ч. р. — це такий заряд, який будучи миттєво введений між висновками випробуваного об'єкта, викличе таку ж миттєву зміну напруги між його виводами, як реальний ч. р. Уявний заряд виражається в кулонах.

Для встановлення співвідношення між $q_{чр}$ і q візьмемо до уваги, що при виникненні ч. р. і зменшенні напруги на ємності C_b на $\Delta U_b = U_{вз} - U_{вп}$ з ємності C_a пішов заряд на підзарядку ємності C_d , що викликав зменшення напруги на об'єкті на ΔU_x .

Використовуючи умову рівності цього заряду уявному заряду ч.р., а також формулу (2.8) отримаємо

$$q_{\text{чр}} = \Delta U_x C_x = \Delta U_{\text{в}} C_{\text{д}} = q \frac{C_{\text{д}}}{C_{\text{д}} + C_{\text{в}}}. \quad (2.9)$$

Легко показати, що (2.9) справедливо при будь-якому співвідношенні між $C_{\text{а}}$, $C_{\text{в}}$, і $C_{\text{д}}$.

Слід зазначити, що зміна напруги на зразку зазвичай дуже мала. Так, наприклад, при $q_{\text{чр}} = 10^{-12}$ Кл, що підлягає реєстрації, і $C_x = 1000$ пФ маємо $\Delta U_x = 10^{-3}$ В. При великих ємностях ΔU_x може бути ще менше. Так як прикладена напруга може досягати багатьох сотень кіловольт, то безпосереднє вимірювання ΔU_x викликає великі труднощі.

Якщо включення має форму прошарку, витягнутої поперек силових ліній поля, то зручно відносити ємності $C_{\text{д}}$ і $C_{\text{в}}$ до одиниці поверхні включення. Тоді формула (2.9) може бути представлена в наступному вигляді:

$$q_{\text{чр}} = q \frac{\frac{\varepsilon_{\text{д}}}{d-d_{\text{в}}}}{\frac{\varepsilon_{\text{д}}}{d-d_{\text{в}}} + \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{d_{\text{в}}}} = \frac{q}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{д}}} \left(\frac{d}{d_{\text{в}}} - 1 \right)} \quad (2.10)$$

З формули (2.10) випливає, що при тому ж заряді q , що проходить через включення, і незмінною товщиною включення $d_{\text{в}}$ здається заряд ч. р. зменшується зі збільшенням товщини діелектрика d .

Надалі напруга на об'єкті відновлюється за рахунок підтікання заряду від джерела напруги та інших ємностей схеми, до якої підключений випробуваний об'єкт. Це призводить до виникнення високочастотних коливань в схемі, реєстрація яких спеціальними вимірювальними пристроями дозволяє досліджувати характеристики ч. р. в ізоляції.

При розгляді процесів поверхневої ерозії діелектрика ч. р. великий інтерес представляє заряд, що проходить через одиницю поверхні включення.

Розглянемо включення у вигляді прошарку, витягнутої поперек силових ліній поля. Якщо поверхню включення, що бере участь в ч. р., Дорівнює S_B , то на підставі (2.8) питомий заряд, що проходить через одиницю поверхні включення, дорівнює:

$$q_{уд} = \frac{q}{S_B} = \left(\frac{\varepsilon_B}{d_B} + \frac{\varepsilon_d}{d-d_B} \right) \Delta U_B. \quad (2.11)$$

Якщо $U_{вп} \ll U_{вз}$, то з врахуванням (2.7) і (2.8),

$$q = (C_B + C_d)(U_{вз} - U_{вп}) \approx (C_B + C_d)U_{вз} = C_d U_{чр} = S_B \frac{\varepsilon_d}{d-d_B} U_{чр}. \quad (2.12)$$

а при $d_B \ll d$ на основі (2.12)

$$q_{уд} = \varepsilon_d \frac{U_{чр}}{d} = \varepsilon_d E_{чр} \quad (2.13)$$

де $E_{чр} = \frac{U_{чр}}{d}$ - напруженість виникнення ч. р. або скорочено напруженість .

Виникнення кожного одиничного ч. р. призводить до виділення в діелектрику випробуваного об'єкту енергії $W_{чр}$. Ця енергія частково витрачається на розігрів випробуваного об'єкта, а частково витрачається на руйнування діелектрика об'єкта. Якщо ємність $C_a \gg C_d$, що має місце в переважній більшості випадків, то енергія одиничного ч. р. може бути визначена як різниця початкової W_H і кінцевої W_K енергій, записаних на ємностях еквівалентної схеми:

$$W_{чр} = W_H - W_K = \frac{C_d + C_B}{2} (U_{вз}^2 - U_{вп}^2). \quad (2.14)$$

Якщо $U_{ва} \approx U_{вп}$, то враховуючи (2.7),

$$W_{\text{чр}} = \frac{C_{\text{д}} + C_{\text{в}}}{2} (U_{\text{вз}} + U_{\text{вп}}) \Delta U_{\text{в}} \approx q U_{\text{вз}} \quad (2.15)$$

Беручи до уваги (2.7) і (2.8), отримаємо:

$$W_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} U_{\text{чр}} \quad (2.16)$$

Якщо $U_{\text{вп}} \ll U_{\text{вз}}$, то на основі (1.14):

$$W_{\text{чр}} = \frac{q U_{\text{вз}}}{2} = \frac{q_{\text{чр}} U_{\text{чр}}}{2} \quad (2.17)$$

Крім кількісних характеристик, що визначають інтенсивність одиничних ч. р., Використовуються інтегральні кількісні характеристики, що визначають інтенсивність ч. р. протягом інтервалу часу, значно більшого, ніж час між двома одиничними ч. р. Такими характеристиками ч.р. є: частота проходження $n_{\text{чр}}$, середній струм $I_{\text{чр}}$, середня потужність $P_{\text{чр}}$ і квадратичний параметр $D_{\text{чр}}$.

Частотою проходження $n_{\text{чр}}$ називається середнє число імпульсів ч. р. в одиницю часу (секунду). Практично можуть бути враховані ч. р. з уявним зарядом вище встановленого значення або ч. р. з уявним зарядом, що знаходяться в певному інтервалі.

Середній струм $I_{\text{чр}}$ являє собою суму абсолютних значень уявних зарядів, що проходять за одну секунду, і вимірюється в Кл/с або А. Якщо сума зарядів вимірюється за інтервал часу t_1 , то:

$$I_{\text{чр}} = \frac{1}{t_1} (|q_{\text{чр}1}| + |q_{\text{чр}2}| + \dots + |q_{\text{чр}m}|) \quad (2.18)$$

Якщо всі заряди мають одне значення $|q_{\text{чр}}|$, то

$$I_{\text{чр}} = n_{\text{чр}} q_{\text{чр}} \quad (2.19)$$

Якщо заряди істотно різні за значенням, то струм рекомендується обчислювати за такою формулою:

$$I_{\text{чр}} = \sum_{i=0}^k \frac{|q_{\text{чр}(i+1)}| + |q_{\text{чр}i}|}{2} (n_{i+1} - n_i). \quad (2.20)$$

де $q_{\text{чр}i}$ — i -й рівень уявних зарядів; n_i — частота проходження ч. р., уявний заряд яких перевищує i -й рівень (значенням $i = 0$ відповідає частота слідування $n = 0$).

При визначенні середнього струму $I_{\text{чр}}$ за формулою (2.20) число рівнів k уявного заряду рекомендується вибирати не менше чотирьох (у яких початковий рівень повинен відповідати $i = 0$), при регулюванні рівнів не більше ніж через 20 дБ.

Середня потужність $P_{\text{чр}}$ — це середня потужність, що підводиться до виводів випробуваного об'єкта для компенсації потужності, що виділяється в випробуваному об'єкті внаслідок ч. р. протягом певного інтервалу часу t_1 :

$$P_{\text{чр}} = \frac{1}{t_1} (q_{\text{чр}1} u_1 + q_{\text{чр}2} u_2 + \dots + q_{\text{чр}m} u_m). \quad (2.21)$$

де $u_1, u_2, \dots, u_m$ — миттєві значення напруги на випробуваному об'єкті в моменти розрядів.

Якщо переважна більшість ч. р. виникає поблизу амплітуди прикладеної напруги U_m , то $P_{\text{чр}}$ може бути наближено визначене за формулою:

$$P_{\text{чр}} = I_{\text{чр}} U_m. \quad (2.22)$$

Так як підведена до уявного випробуваного об'єкта потужність $P_{\text{чр}}$ повинна дорівнювати потужності, що виділяється в об'єкті внаслідок ч. р., то,

якщо всі розряди мають одну і ту ж енергію $W_{\text{чр}}$, потужність $P_{\text{чр}}$ може бути визначена також за формулою:

$$P_{\text{чр}} = \sum_{i=0}^k \frac{|W_{\text{чр}(i+1)}| + |W_{\text{чр}i}|}{2} (n_{i+1} - n_i). \quad (2.24)$$

де $W_{\text{чр}(i+1)}$ i -й рівень енергії; n_i - частота проходження ч. р., енергія яких перевищує n_i рівень (значенням $i = 0$ відповідає частота слідування $n = 0$).

Квадратичний параметр $D_{\text{чр}}$ являє собою суму квадратів зарядів, що проходять через виводи випробуваного об'єкта в результаті ч. р. за одну секунду. Якщо вимір суми квадратів зарядів проводиться за інтервал часу t_1 , то:

$$D_{\text{чр}} = \frac{1}{t_1} (q_{\text{чр}1}^2 + q_{\text{чр}2}^2 + \dots + q_{\text{чр}m}^2). \quad (2.25)$$

Якщо всі заряди мають одне значення $|q_{\text{чр}}|$, то

$$D_{\text{чр}} = n_{\text{чр}} q_{\text{чр}}^2. \quad (2.26)$$

Якщо заряди істотно різні за значенням, то

$$D_{\text{чр}} = \sum_{i=0}^k \frac{|q_{\text{чр}(i+1)}^2| + |q_i^2|}{2} (n_{i+1} - n_i). \quad (2.27)$$

де $q_{\text{чр}i}$ — i -й рівень рівень квадрата заряду; n_i - частота проходження ч. р., квадрат заряду яких перевищує i -й рівень (значенням $i = 0$ відповідає частота слідування $n = 0$).

Дослідження ч. р. в газовому прошарку за допомогою електронно-оптичного перетворювача (ЕОП) показали, що в ряді випадків кожен імпульс, який реєструється пристроєм для вимірювання ч. р., відповідає кільком

мікророзрядам. Інтервал часу між окремими мікророзрядами складає близько 3×10^{-8} с, причому кожен мікророзряд є дискретний у часі і просторі іскровий канал.

Оптична картина ч. р. істотно залежить від тиску газу p в прошарку, товщини прошарку d_v , роду діелектрика, роду газу. При значеннях pd_v менше деякого критичного $(pd_v)_{кр}$ ч.р. розвиваються у вигляді серії мікророзрядів, а при $pd_v > (pd_v)_{кр}$ ч. р. являє собою один більш потужний розряд. Якщо у миттєвого анода розташований полімерний твердий діелектрик, а у катода - скло, то канали окремих мікророзрядів мають конусоподібну форму і складаються з ділянки, яка слабо світиться поблизу катода і яскраво світиться поблизу анода. При катоді, вкритому полімером, і металевому аноді розряд виникає у вигляді одного іскрового каналу. У деяких випадках спостерігаються мікророзряд, що супроводжуються розрядами по поверхні діелектрика.

Заряд $q_{мр}$ і енергія $W_{мр}$ одного мікророзряду може бути визначена за формулами:

$$q_{мр} = \frac{\Delta S_v}{S_v} q_{чр} = \frac{q_{чр}}{m_{мр}} \text{ і } W_{мр} = \frac{\Delta S_v}{S_v} W_{чр} = \frac{W_{чр}}{m_{мр}} \quad (2.28)$$

де ΔS_v - середня площа поверхні включення, розряджається одним мікророзрядом; S_v загальна площа включення, що бере участь в ємності C_v ; $m_{мр} = \frac{\Delta S_v}{S_v}$ - число мікророзрядів, які складаються з одного ч. р.; ΔS_v залежить від виду діелектрика і зростає зі збільшенням газового прошарку d_v від 1 до 6 мм.

Формули (2.8) і (2.14) з врахуванням мікророзрядів можуть бути в такому вигляді:

$$q = m_{мр} \frac{\Delta S_v}{S_v} (C_d + C_v)(U_{вз} - U_{вп}). \quad (2.29)$$

$$W_{\text{чр}} = m_{\text{мр}} \frac{\Delta S_{\text{в}}}{2S_{\text{в}}} (C_{\text{д}} + C_{\text{в}}) (U_{\text{вз}}^2 - U_{\text{вп}}^2). \quad (2.30)$$

При розгляді ч. р. деякі автори використовують більш складні еквівалентні схеми заміщення діелектрика з включенням, що дозволяють більш точно враховувати виділення енергії у включенні з урахуванням перерозподілу поля в діелектриках.

Розрахунки показують, що в витягнутих порожнинах малого діаметра на одиницю площі виділяється енергія в 10-100 разів більша за ту, яка звільняється за рахунок деполяризації зарядів, накопичених на протилежних стінках порожнини. Збільшення питомої енерговиділення і питомого значення потужності ч. р. є однією з причин низької тривалої електричної міцності діелектрика з порожнинами, витягнутими в напрямку силових ліній поля.

2.3 Часткові розряди при змінній напрузі

Якщо до випробуваному об'єкту прикладена змінна синусоїдальна напруга $u = U_m \sin \omega t$, то при відсутності ч. р. напруга на ємності включення також синусоїдально і дорівнює $u = U_{\text{вм}} \sin \omega t$ де $U_{\text{вм}}$ - амплітуда напруги при включенні.

$$U_{\text{вм}} = U_m \frac{C_{\text{д}}}{C_{\text{в}} + C_{\text{д}}} = U_m \eta. \quad (2.31)$$

$$\text{де, } \eta = \frac{C_{\text{д}}}{C_{\text{в}} + C_{\text{д}}}.$$

У разі включення у вигляді прошарку товщиною $d_{\text{в}}$, витягнутої поперек силових ліній поля(2.32):

$$U_{\text{вм}} = U_m \frac{\frac{\varepsilon_{\text{д}}}{d_{\text{в}}} / (d - d_{\text{в}})}{\frac{\varepsilon_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} + \frac{\varepsilon_{\text{д}}}{(d - d_{\text{в}})}} = U_m \frac{\varepsilon_{\text{д}} d_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{в}} (d - d_{\text{в}}) + \varepsilon_{\text{д}} d_{\text{в}}} \quad (2.32)$$

При впливі на випробуваний об'єкт першого напівперіода напруги ч.р. виникне тоді, коли напруга на включенні (ємність C_v , Рисунок 2.1) досягне значення $U_{вз}$ (напруги запалювання розряду у включенні). При пробі напруга на включенні падає до $U_{вп}$ (напруги згасання розряду у включенні), при якому розряд гасне.

Після згасання розряду напруга на включенні починає наростати від значення $U_{вп}$ по кривій, що відповідає зміні прикладеної напруги, зміщеною по вертикалі на значення постійної складової, яка виникла внаслідок появи зарядів на поверхні включення (на ємності C_v). Коли напруга U_v на ємності C_v досягне значення $U_{вз}$, процес повторюється.

Отже, розряди в даній області діелектрика повторюються через проміжки часу, відповідні зміни напруги на C_v на $\Delta U_v = U_{вз} - U_{вп}$. При проходженні напруги через максимум включення знаходиться під напругою, значення якого лежить в інтервалі між $U_{вз}$ та $U_{вп}$. Потім відбувається зменшення напруги на включенні до 0 і подальше зростання до $U_{вз}$. У першому наближенні можна прийняти, що при обох полярностях пробивна напруга включення однакова. При досягненні напругою на включенні значення $U_{вз}$ відбувається пробій включення і процес триває описаним вище чином (Рисунок 2.4).

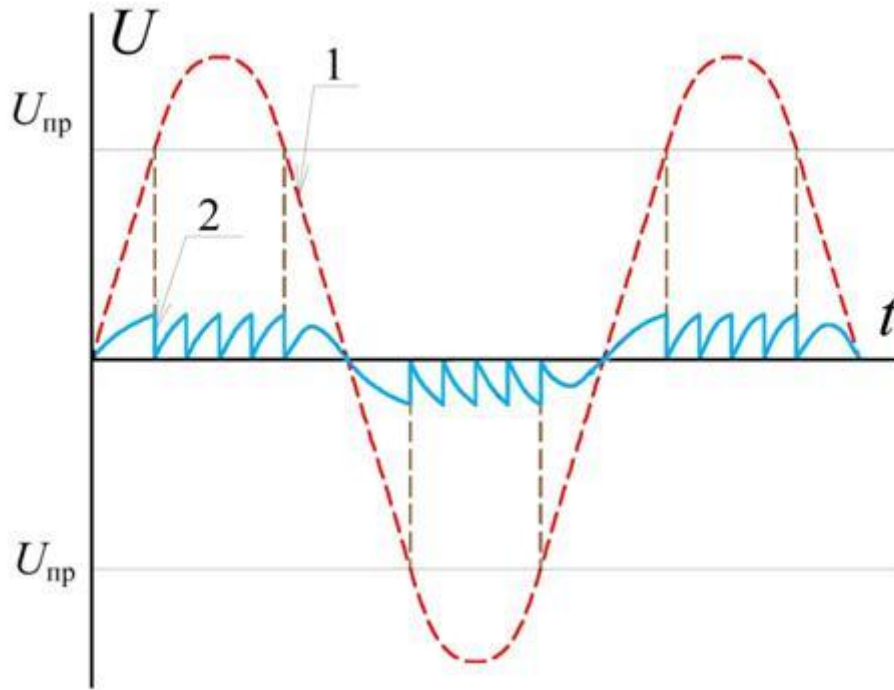


Рисунок 2.4 Розвиток в часі ч.р. при змінній напрузі

При такому механізмі явища ч. р. повинні припинятися при проходженні напруги через максимум і знову виникати, коли напруга на виходах випробуваного об'єкта досягне значення U_1 відповідного зміни напруги на включенні на $U_{в1} \approx U_{вз} + U_{вп}$.

Надалі після відновлення ч.р. розряди в даній області діелектрика, як і раніше, повторюються через проміжки часу, відповідні зміни напруги на ємності C_B на ΔU_B в або на виводах випробуваного об'єкта на:

$$\Delta U = \frac{\Delta U_B}{\eta} \quad (2.33)$$

Таким чином число розрядів при включенні за один на півперіод:

$$m_{чр} = \frac{2U_{вт} - (U_{вз} + U_{вп})}{U_{вз} - U_{вп}} + 1 = \frac{2(U_{вт} - U_{вп})}{\Delta U_B} = \frac{2(U_T - U'_п)}{\Delta U_B} \quad (2.34)$$

де $U'_п = \frac{\Delta U_B}{\eta}$. При $U_{вз} \approx U_{вп}$ і $\frac{U_{вз}}{\eta} = U_з = U_{чр}$ маємо:

$$m_{\text{чр}} \approx \frac{2(U_{\text{вТ}} - U_{\text{вЗ}})}{\Delta U_{\text{в}}} = \frac{2(U_{\text{т}} - U_{\text{чр}})}{\Delta U_{\text{в}}}. \quad (2.35)$$

При $U_{\text{вП}} \ll U_{\text{вЗ}}$

$$m_{\text{чр}} \approx \frac{2U_{\text{вТ}}}{U_{\text{вЗ}}} = \frac{2U_{\text{т}}}{U_{\text{чр}}} \quad (2.36)$$

При цьому число розрядів при включенні $n_{\text{чр}}$ за 1 с буде:

$$n_{\text{чр}} = 2fm_{\text{чр}} \quad (2.37)$$

де, f — частота прикладеної напруги.

Враховуючи (2.14), (2.23), (2.34) потужність ч.р. $P_{\text{чр}}$ в одному включенні може бути показана у виді:

$$P_{\text{чр}} = W_{\text{чр}} n_{\text{чр}} = 2f(C_{\text{д}} + C_{\text{в}})(U_{\text{вЗ}} + U_{\text{вП}})(U_{\text{вТ}} - U_{\text{вП}}) \quad (2.38)$$

Якщо $U_{\text{вЗ}} \approx U_{\text{вП}}$, то

$$P_{\text{чр}} = 4f(C_{\text{д}} + C_{\text{в}})U_{\text{вЗ}}(U_{\text{вТ}} - U_{\text{вЗ}}) = 4fC_{\text{д}}U_{\text{вЗ}}(U_{\text{т}} - U_{\text{чр}}) \quad (2.39)$$

Якщо $U_{\text{вП}} = 0$, то

$$P_{\text{чр}} = 2f(C_{\text{д}} + C_{\text{в}})U_{\text{вЗ}}U_{\text{вТ}} = 2fC_{\text{д}}U_{\text{вЗ}}U_{\text{т}} \quad (2.40)$$

З виразів (2.38) - (2.40) випливає, що для одного включення або при фіксованій кількості однакових включень потужність ч. р. лінійно зростає з ростом прикладеної напруги.

При $U_{\text{вЗ}} \approx U_{\text{вП}}$, враховуючи (2.16) і (2.23), потужність ч. р. може бути також представлена в наступному вигляді:

$$P_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} U_{\text{чр}} n_{\text{чр}} = I_{\text{чр}} U_{\text{чр}}. \quad (2.41)$$

Відповідно при $U_{\text{вз}} \ll U_{\text{вп}}$, враховуючи (2.17) і (2.23),

$$P_{\text{чр}} = \frac{q_{\text{чр}} U_{\text{чр}} n_{\text{п}}}{2} = \frac{I_{\text{чр}} U_{\text{чр}}}{2}. \quad (2.42)$$

На основі (2.21), потужність $P_{\text{чр}}$, яка виділяється в одиночному включенні, може бути також в такому вигляді:

$$P_{\text{чр}} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{m_{\text{чр}}} q_{\text{чр}i} u_i. \quad (2.43)$$

де u_i - миттєве значення напруги на діелектрику в момент часу розряду з уявним зарядом $q_{\text{чр}i}$; $m_{\text{чр}}$ - загальна кількість розрядів в одиничному включенні за напівперіод $T/2$. При використанні формули (1-43) необхідно враховувати знаки при $q_{\text{чр}i}$ і u_i

Як приклад визначимо енергію $W_{T/2}$, яка підводиться до виводів випробуваного об'єкта за напівперіод $T/2$, для компенсації енергії, що виділилася у включенні внаслідок ч. р. розглянемо один напівперіод від максимуму напруги однієї полярності до максимуму напруги протилежної полярності (Рисунок 2.4). В цьому випадку при визначенні $W_{T/2}$ енергія ч. р., що виникають від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 , відповідного переходу напруги через нуль, повинна бути взята з одним знаком, а енергія ч. р., що виникають від моменту часу t_2 до моменту часу t_3 , відповідного переходу напруги через максимум, — з іншим.

Якщо прийняти $q_{\text{чр}i} = q_{\text{чр}} = \text{const}$, то формула (1-21) може бути представлена в наступному вигляді:

$$P_{\text{чр}} = \frac{2}{T} q_{\text{чр}} | -[\Delta U + 2\Delta U + \dots + (m_1 - 1)\Delta U + (U_m - U_1)] + [\Delta U + 2\Delta U + \dots + (m_2 - 1)\Delta U + U_m] | = \frac{2}{T} q_{\text{чр}} | (U_m - U_1 + \Delta U)(U_m - U_1 + 2\Delta U) + \dots + [U_m - U_1 + (m_3 - 1)\Delta U] + U_m |. \quad (2.44)$$

$$\text{де } m_1 = \frac{U_m - U_1}{\Delta U}; m_2 = \frac{U_m}{\Delta U}; m_3 = m_2 - m_1 = \frac{U_1}{\Delta U}.$$

Формула (2.44) може бути показана у вигляду:

$$P_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} m_3 f(2U_m - U_1 + \Delta U) = q_{\text{чр}} f \frac{U_1(2U_m - U_1 + \Delta U)}{\Delta U}. \quad (2.45)$$

Враховуючи (2.34) і (2.37), отримаємо:

$$P_{\text{чр}} = \frac{q_{\text{чр}} U_1 n_{\text{чр}}}{2} = \frac{I_{\text{чр}} U_1}{2}. \quad (2.46)$$

При $U_{\text{вз}} \approx U_{\text{вп}}$ маємо $U_1 \approx 2U_{\text{чр}}$ і

$$P_{\text{чр}} = I_{\text{чр}} U_{\text{чр}}. \quad (2.47)$$

При $U_{\text{вз}} \ll U_{\text{вп}}$

$$P_{\text{чр}} = \frac{I_{\text{чр}} U_{\text{чр}}}{2} = 2f q_{\text{чр}} U_m. \quad (2.48)$$

Порівняння формул, отриманих для потужності, що витрачається в одному включенні, (2.41) і (2.42) з відповідними формулами, отриманими для потужності, що підводиться до виводів випробуваного об'єкта, (2.47) і (2.48) показує їх повну ідентичність.

Для більшості ізоляційних конструкцій зі зростанням напруги кількість областей (включень), в яких виникають ч. р., не залишається постійним, а

збільшується, що призводить до більш сильної залежності числа розрядів в секунду і потужності ч. р. від напруги, ніж за формулами (2.34), (2.37) і (2.38).

Збільшення з ростом напруги числа включень, в яких виникають ч. р., Відбувається відповідно до статистичних розкидом напруги запалювання ч. р. в окремих включених.

Як показали досліди, можна вважати, що розподіл напружень запалювання ч. р. підпорядковується нормальному закону із середнім значенням $U_{вз.ср.}$ і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{вз.}$.

2.4 Діелектричні втрати при наявності часткових розрядів

При виникненні ч. р. досить великої інтенсивності спостерігається збільшення діелектричних втрат за рахунок потужності, що виділяється при ч. р. Це збільшення діелектричних втрат може бути зареєстровано щодо збільшення $\tan \delta$ в ізоляції випробуваного об'єкта.

При наявності ч. р. втрати в діелектрику випробуваного об'єкта ємністю C_x складаються з втрат на ч. р. $P_{чр}$ і інших видів діелектричних втрат P_d . Якщо $\tan \delta_d$, відповідний втратам P_d , не залежить від напруги, то P_d пропорційна квадрату напруги:

$$P_d = U^2 \omega C_x \tan \delta_d = U^2 g. \quad (2.49)$$

де $g = \omega C_x \tan \delta_d$ — еквівалентна активна провідність.

При наявності одного включення або при незмінній кількості однакових включень потужність ч. р. $P_{чр}$, як це впливає з виразів (2.38) - (2.40), лінійно зростає з збільшенням прикладеної напруги.

В цьому випадку при наявності ч.р. $\tan \delta$ може бути виведений наступним співвідношенням:

$$\tan \delta = \frac{P_d + P_{чр}}{U^2 \omega C_x} = \frac{U^2 g + k(U - U_{чр})}{U^2 \omega C_x}. \quad (2.50)$$

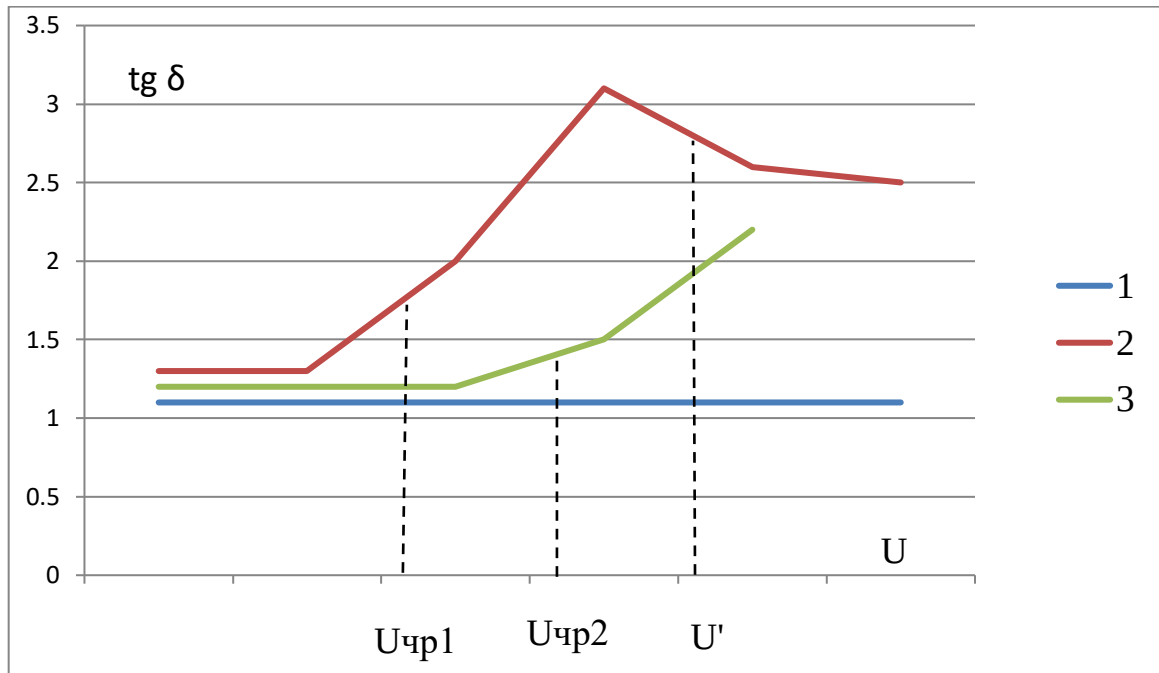


Рисунок 2.5 Характерна залежність $\tan \delta$ від напруги

Залежність $\tan \delta$ від напруги має максимум при певній напрузі U' значення U' може бути визначено з умови $d \tan \delta / dU = 0$ і дорівнює $2U_{чр}$ (Рисунок 2.5, крива 2). При цьому передбачається, що область діелектрика, охоплена ч. р., збільшується зі зростанням напруги, тобто величина k від напруги не залежить.

Як зазначалося вище, в більшості ізоляційних конструкцій зі зростанням напруги зростає кількість місць (включень), в яких розвиваються ч. р. Крім того, поява ч. р. призводить до руйнування діелектрика і збільшення обсягу включень. У цьому випадку збільшення напруги вище напруги запалювання ч. р. супроводжується різким підйомом $\tan \delta$. За підйому $\tan \delta$ можна орієнтовно судити про значення $U_{чр}$ (крива 3, Рисунок 2.5). Зазвичай при подальшому збільшенні напруги зростання $\tan \delta$ не припиняється до пробою ізоляції.

2.5 Залежність напруженості часткових розрядів від товщини діелектрика

Виникнення часткових розрядів в ізоляції з сильно неоднорідним полем. Напряга ч. р. визначається конфігурацією електричного поля і електричною міцністю ізоляції в області найбільшої напруженості.

Для багатьох ізоляційних конструкцій велике значення має випадок, коли електроди являють собою плоскі або циліндричні поверхні з гострими краями, між якими знаходиться діелектрик (Рисунок 2.6, а). До розглянутого випадку відноситься ізоляція конденсаторів, кабельних муфт, прохідних ізоляторів і трансформаторів струму з ізоляцією конденсаторного типу, ізоляція електричних машин в місці виходу з паза і т.д.

Для цих ізоляційних конструкцій товщина діелектрика між електродами визначає значення напруги $U_{\text{чр}}$ і середньої напруженості $E_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{чр}}}{d}$ виникнення ч. р.

Біля гострого краю обкладки виникає сильно неоднорідне поле зі значною складовою напруженості, спрямованої уздовж шарів ізоляції.

Напруженість поля на відстані r від краю електрода при $r < 0.1d$ й може бути оцінена за такою формулою:

$$E_r = \frac{U}{\sqrt{\pi d r}} = E_{\text{ср}} \sqrt{\frac{d}{\pi r}}. \quad (2.51)$$

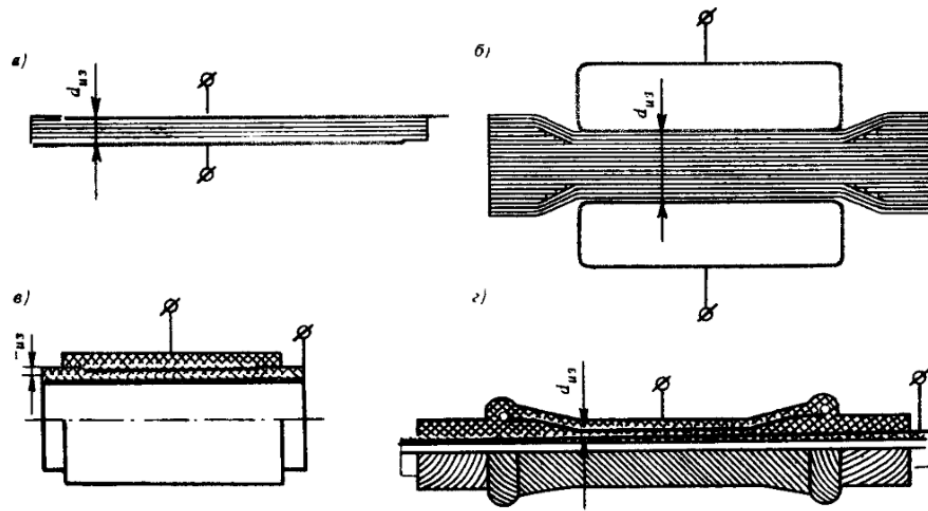


Рисунок 2.6 Деякі конструкції зразків ізоляції: а, в - електроди з гострими краями; б, г - електроди з ослабленим крайовим ефектом

З формули (2.51) може бути знайдена залежність $E_{чр}$ від товщини ізоляції d . Умовою виникнення ч. р. у краю обкладки можна вважати рівність напруженості поля на деякій певній відстані $r_0 = const$ від краю обкладки значенням E_{r0} , достатньому для розвитку розряду. Тоді:

$$E_{r0} = \frac{U_i}{\sqrt{\pi d r_0}}. \quad (2.52)$$

і, відповідно, напруга ч.р.:

$$U_{чр} = E_{r0} \sqrt{\pi d r_0} = A d^{0.5}. \quad (2.53)$$

Звідси середня напруженість ч.р.:

$$E_{чр} = A d^{-0.5}. \quad (2.54)$$

Для оцінки напруженості поблизу краю фольги можна скористатися також розрахунком поля пластини з заокругленим краєм проти площини, або пластини з заокругленим краєм, укладеної між двома симетрично

розташованими площинами з однаковим потенціалом. В цьому випадку напруженість у краю пластини з радіусом r , розташованої на відстані d від площини (або площин), може бути визначена за формулою:

$$E_{max} = G E_{cp} \sqrt{\frac{d+r}{r}}. \quad (2.55)$$

де $E_{cp} = U/d$, при чому для малих r маємо $G \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}}$, а для більших $G \rightarrow 1.0$.

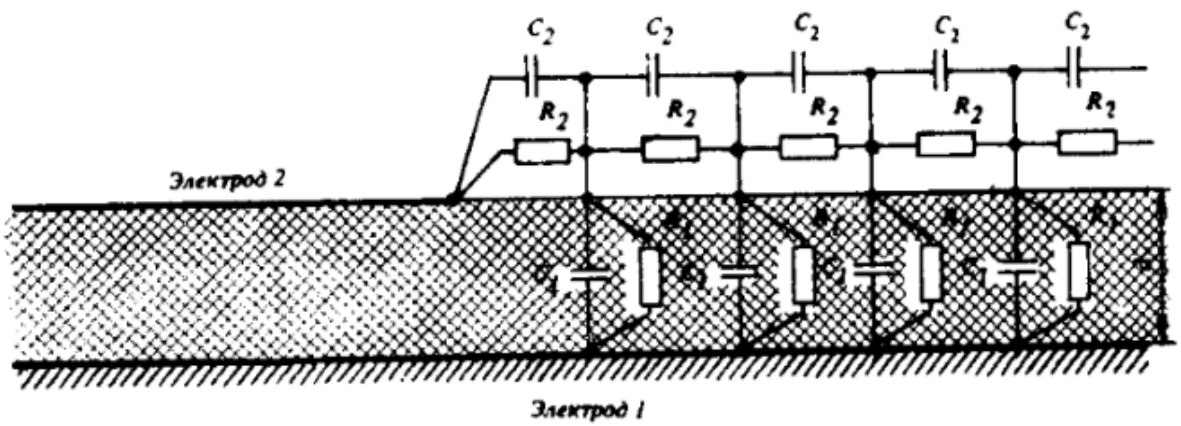


Рисунок 2.7 Схема заміщення діелектрика на краю електрода

Якщо прийняти, що виникнення ч. р. відповідає певному значенню максимальної напруженості на поверхні електрода E_0 , то при $r \ll d$

$$E_{cp} = \frac{E_0}{G\sqrt{d}} = Ad^{-0.5}. \quad (2.56)$$

де постійна A залежить від виду ч.р.

Таким чином, залежно напруженості ч. р. від товщини діелектрика за формулами (2.54) і (2.56) збігаються.

Аналогічна конструкція формули слід також з розгляду схеми заміщення діелектрика на краю електрода, згідно Рисунок 2.7, при розвитку ковзаючих розрядів по поверхні діелектрика. Позначимо: $C_1 = \frac{\varepsilon_1}{d}$ — ємність одиниці поверхні діелектрика щодо нижнього електрода 1; $C_2 = k\varepsilon_2$ — еквівалентна (з

урахуванням впливу інших елементів) взаємна ємність сусідніх одиниць поверхні діелектрика відносно одна одної; d - товщина діелектрика; $R_1 = \rho_v d$ — опір стовпа діелектрика висотою d і площею, що дорівнює одиниці поверхні; $R_2 = \rho_s$ — питомий поверхневий опір діелектрика; ε_1 і ε_2 — діелектричні проникності діелектрика і середовища; ρ_v — питомий еквівалентну об'ємний опір діелектрика.

При змінній напрузі ρ_v визначаються втратами в діелектрику і дорівнює:

$$\rho_v = \frac{1}{\omega \varepsilon_1 \tan \delta}. \quad (2.57)$$

Якщо до електродів прикладена напруга $\dot{U}$, то залежність напруги $\dot{U}_x = f(x)$ розглянутої ланцюгової схеми може бути представлена у вигляді:

$$\dot{U}_x = \dot{U} \frac{\operatorname{sh} m(l-x)}{\operatorname{sh} ml}. \quad (2.58)$$

де

$$m = \sqrt{\frac{(1/R_1) + j\omega C_1}{(1/R_2) + j\omega C_2}}. \quad (2.59)$$

Напруженість вздовж поверхні діелектрика

$$\dot{E}_x = -\frac{dU_x}{dx} = \dot{U}_m \frac{\operatorname{ch} m(l-x)}{\operatorname{sh} ml}. \quad (2.60)$$

Найбільша напруженість виходить при $x = 0$:

$$E_{x \max} = \dot{U}_m \operatorname{cth} ml. \quad (2.61)$$

Припустимо, що ч.р. може виникнути при такій напрузі $U_{\text{чр}}$, при якому $E_{x \text{ max}}$ досягне деякого критичного значення E_0 , відповідно електричній міцності рідкого діелектрика, навкруги верхнього електрода. При цьому:

$$\dot{U}_{\text{чр}} = \frac{E_0}{m} th \, ml. \quad (2.62)$$

де $m = m_r + jm_i$.

Для середовища з високим питомим опором, що призводить до великих ρ_s а саме ($\rho_s > 10^{12}$ Ом), можна знехтувати $1/\rho_s$ в порівнянні з ωC_2 . Крім того, для всіх технічних діелектриків $1/R_1 \ll \omega C_1$. Тоді параметр m виявляється вагомим і рівним:

$$m = \sqrt{\varepsilon_1 / (k \varepsilon_2 d)}. \quad (2.63)$$

При $\rho_s \ll 10^{12}$ Ом, що в ряді випадків характерно для ізоляції, просоченої технічними рідкими діелектриками, в першому наближенні можна знехтувати ωC_2 .

Тоді

$$m = \sqrt{j \rho_s \omega C_2} = (1 + j) \sqrt{\rho_s \omega \varepsilon_1 / (2d)}. \quad (2.64)$$

Далі, при $l \gg d$ впровадження $ml > 10$ і $th \, ml \approx 1$. Тому, переходячи у формулу (1.62) до модулів комплексних величин, отримаємо для напруги ч.р.:

$$U_{\text{чр}} = \frac{E_0}{m}. \quad (2.65)$$

Формула (1.65) при $\rho_s > 10^{12}$ Ом матиме вигляд:

$$U_{\text{чр}} = E_0 \sqrt{\frac{k\varepsilon_2 d}{\varepsilon_1}}. \quad (2.66)$$

І при $\rho_s < 10^{12}$ Ом:

$$U_{\text{чр}} = E_0 \sqrt{\frac{d}{(\rho_s \omega \varepsilon_1)}}. \quad (2.67)$$

Як формула (2.66), так і формула (2.67) призводять до наступних залежностей напруги ч. р. від товщини діелектрика:

$$U_{\text{чр}} = Ad^{0.5}. \quad (2.68)$$

що відповідає формулі (1.56)

На основі (2.68) для напруженості ч.р. при $\rho_s > 10^{12}$ Ом

$$E_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{чр}}}{d} = E_0 \sqrt{\frac{k\varepsilon_2}{(d\varepsilon_1)}}. \quad (2.69)$$

І при $\rho_s < 10^{12}$ Ом:

$$E_{\text{чр}} = \frac{E_0}{\sqrt{d\rho_s \omega \varepsilon_1}}. \quad (2.70)$$

Як формула (2.69), так і формула (2.70) призводять до наступної залежності напруженості ч.р. від товщини діелектрика:

$$E_{\text{чр}} = Ad^{-0.5}. \quad (2.71)$$

що відповідає формулам (2.54) або (2.56).

Формула (2.71) добре підтверджується експериментально.

З (2.71) видно, що напруженість ч. р. росте зі зменшенням товщини ізоляції. Тому для підвищення напруги і середньої напруженості ч. Р. в області гострого краю електрода вигідно мати замість одного шару ізоляції товщиною

d кілька (n) тонких шарів з товщиною d/n , розділених металевими обкладинками.

Виникнення часткових розрядів в ізоляції зі слабо неоднорідним полем. Для ізоляції зі слабо неоднорідним або однорідним полем залежності напруженості ч. р. від товщини діелектрика можуть бути отримані з розгляду еквівалентної схеми діелектрика з включенням, згідно Рисунок 2.1.

Якщо припустити, що включення розташоване паралельно електродів і при відносно великій площі товщина його мала, то в першому наближенні поле можна вважати однорідним.

Позначимо повну напругу через u , а її складові на ємностях C_B і C_D — через u_B і u_D . Тоді:

$$\frac{u_D}{u_B} = \frac{C_B}{C_D} = \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B}. \quad (2.72)$$

Далі

$$u = u_B + u_D = u_B \left[1 + \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B} \right]. \quad (2.73)$$

Ч. р. виникнуть тоді, коли напруга на включенні u_B досягне пробивного значення U_{B3} . Таким чином:

$$U_{чр} = U_{B3} \left[1 + \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B} \right]. \quad (2.74)$$

Знайдемо середню напруженість ч.р.

$$E_{чр} = \frac{U_{чр}}{d} = \frac{U_{B3}}{d} \left[1 + \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B} \right]. \quad (2.75)$$

Після перефразування отримаємо:

$$E_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{вз}}}{\varepsilon_{\text{д}} d_{\text{в}}} \left[\varepsilon_{\text{в}} + \frac{(\varepsilon_{\text{д}} - \varepsilon_{\text{в}}) d_{\text{в}}}{d} \right]. \quad (2.76)$$

Вираз (2.76) показує, що при незмінних розмірах включення при $\varepsilon_{\text{д}} > \varepsilon_{\text{в}}$ напруженість ч. р. падає з ростом товщини діелектрика, проте залежність $E_{\text{чр}}$ від d в цьому випадку значно слабкіше, ніж в сильно неоднорідному полі. При $\varepsilon_{\text{д}} = \varepsilon_{\text{в}}$ значення $E_{\text{чр}}$ в однорідному полі не залежить від товщини діелектрика.

При $\varepsilon_{\text{д}} < \varepsilon_{\text{в}}$ напруженість ч.р. дещо зростає з ростом товщини діелектрика.

2.6 Основні процеси руйнування ізоляції частковими розрядами

Комплекс експлуатаційних впливів, що викликають старіння ізоляції, різноманітний і складний, проте в багатьох випадках основною причиною старіння є електричне поле високої напруженості. Як встановлено багатьма дослідженнями, під дією електричного поля старіння відбувається переважно за рахунок розвитку в ізоляції ч. р.

Руйнівну дію ч. р. є результатом теплового впливу, бомбардування зарядженими частинками (в основному електронами), впливу хімічно активних продуктів, що утворилися в процесі розвитку ч. р., а також ударних хвиль і випромінювання.

Дія цих чинників викликає ерозію (руйнування поверхні з винесенням матеріалу), а також структурні зміни (деструкція, зшивання полімерних ланцюгів). Ерозія може бути обумовлена наступними причинами:

а) окисленням полімерів високо-реактивними радикалами, існуючими тільки в зоні дії розряду;

б) реакціями мікро-радикалів полімеру, що утворилися під дією розрядів, з киснем газової середовища або іншими активними речовинами, що виникли в результаті ч.р .;

в) бомбардуванням поверхні діелектрика електронами і іонами.

Дослідження зміни пробивної напруги $U_{пр}$, товщини d і маси M показали, що при дії на плівки тільки продуктів розряду товщина і маса плівок практично не змінюються. У той же час при безпосередньому впливі розрядів спостерігається суттєва зміна пробивної напруги, товщини і маси плівок (Рисунок 2.8).

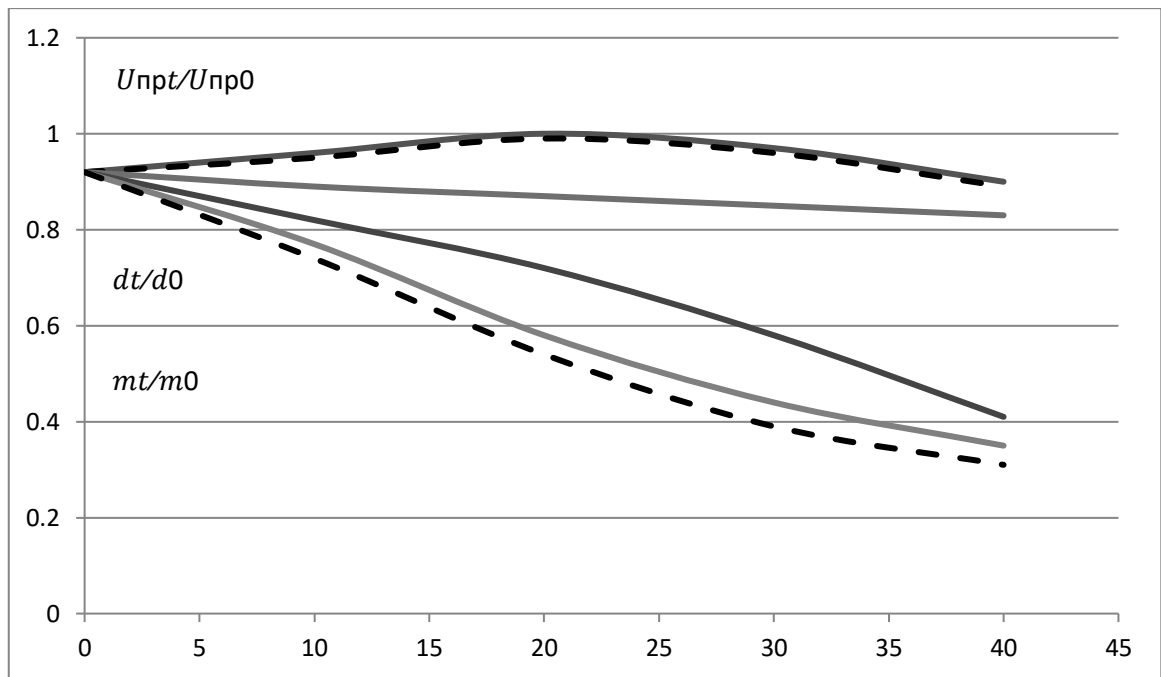


Рисунок 2.8. Залежно пробивної напруги $U_{прt}/U_{пр0}$ (•), товщини d_t/d_0 (•) і маси m_t/m_0 від часу для плівки ПЕТФ при безпосередньому (1) і непрямому (2) дії розрядів.

Іноді ерозію пов'язують з процесами нагріву поверхні діелектрика в місцях зіткнення з каналами окремих ч. р. і подальшого випаровування діелектрика. Ерозія і руйнування діелектрика можуть відбуватися за рахунок електронного бомбардування його поверхні, так як значна частина енергії розряду переноситься електронами. Це підтверджується даними, за якими ерозія зразків з поверхні, розташованої перпендикулярно напрямку розрядів, значно інтенсивніше ерозії з поверхні, розташованої уздовж напрямку розрядів. З плином часу відбуваються місцеві збільшення глибини ерозії; поступово виділяються переважні напрями інтенсивного руйнування

матеріалу, які в ряді випадків можуть перетворюватися в гіллясті руйнування (дендрити). При ч.р. малої інтенсивності основну роль в процесі ерозії відіграє реакція окислення, швидкість якої при вільному доступі кисню зростає в 1,5 рази.

При інтенсивних розрядах причиною руйнування діелектрика переважно є термодеструкція полімерів за рахунок енергії розряду.

У початковий період товщина шару, який старіє при постійному числі мікророзрядів у включенні зростає пропорційно лінійної щільності енергії мікророзрядів $W_{\text{л}} = W_{\text{мр}} / d_{\text{е}}$, де $W_{\text{мр}}$ — енергія одного мікророзрядів, $d_{\text{е}}$ — ефективна товщина зазору (довжина зони світіння ч.р.).

Через деякий час середня товщина шару, який старіє прагне до сталого значення, що пов'язано перш за все з впливом газоподібних продуктів розряду. Зшивання полімерних ланцюгів або їх руйнування охоплює не весь зразок, а лише шар, що примикає до поверхні.

Структура ізоляції змінюється при безпосередньому впливі розрядів на діелектрик (електронно-іонна бомбардування, ультрафіолетове опромінення), а також і внаслідок впливу газоподібних та інших продуктів, що виникли в результаті розряду (озон, оксиди азоту, атомарний кисень, хлор, хлористий водень, соляна та інші кислоти). Структурні зміни матеріалу діелектрика проявляються в зміні інфрачервоних спектрів, молекулярної маси, збільшення $\tan \delta$, зміні діелектричної проникності ε і питомої об'ємного опору ρ_v .

Всі структурні зміни під дією розрядів можна розділити на два типи: перші, зосереджені до глибини приблизно 3 мкм (наприклад, в поліетилені), — викликані безпосередньою дією розрядів (освіта подвійних вуглецевих зв'язків, гідроксильних груп, нітрогруп); другі — зосереджені на великих глибинах, до 12 мкм, і викликані дією газоподібних продуктів (створення озонідів, карбонільних груп). Товщина шару із структурними змінами визначається глибиною дифузії кисню або озону в зразок.

Структурні зміни під дією ч.р. відрізняються від змін при опроміненні частинками високих енергій, і в них важливу роль відіграють окисні процеси: у полімерів, які зшивають після електричного старіння інфрачервоні спектри показують збільшення числа кисневих містків, а при процесах деструкції під впливом частинок високих енергій збільшується число кінцевих карбонільних груп.

Характер структурних змін в діелектриках може бути досить добре виявлено за допомогою аналізу інфрачервоних спектрів поглинання матеріалів до і після впливу ч. р. Як приклад на рисунок 2.2 наведені інфрачервоні спектри поліетилену до і після старіння при впливі ч. р. в різних газових середовищах. Як випливає з малюнка, при ч. р. в повітрі в поліетилені з'являються смуги при 1716, 1640, 1290, 1200 і 865 см^{-1} . При ч. р. в кисні з'являються смуги 1716, 1290 і 1200 см^{-1} , а при ч. р. в азоті помітної зміни спектра не відбувається. Поява смуги поглинання в інтервалі $1710\text{--}1720\text{ см}^{-1}$ свідчить про утворення карбонільних груп в результаті окислення; смуга 1640 см^{-1} показує на появу подвійних зв'язків $>C=C<$; смуги 1290 і 1200 см^{-1} і можуть бути віднесені до ефірних ($R-OR'$) і карбоксильних груп.

Цікаво відзначити, що порядок розташування полімерів по стійкості до різних впливів різний. За інтенсивністю змін інфрачервоних спектрів, молекулярної маси, по створенні зшитої фракції під дією ч. р. плівки розташовуються в наступному порядку: найменш стійким виявляється поліетилен, більш стійким — полістирол і ще більш — поліетилентерефталат.

Але по стійкості до ерозії під дією ч.р. ці полімери розташовуються в іншому порядку: найменш стійким до ерозії є поліетилентерефталат, більш стійким — полістирол і ще більш — поліетилен. На підставі цього можна зробити висновок про відсутність відповідності між інтенсивністю структурних змін і швидкістю ерозії під дією ч.р.

При ч.р. в твердих і рідких діелектриках в відсутності газових включень особливу роль набуває авто-термоелектрична емісія з поверхні електрода при негативній його полярності. Подібні процеси можуть мати місце і при

позитивній полярності електрода, але в цьому випадку провідність має, мабуть, дірковий механізм. При цьому робота виходу становить не більше 3 еВ внаслідок зниження потенційного бар'єру на межі поділу речовин; або за рахунок накопичуються об'ємних розрядів, або за рахунок впливу ближнього порядку колективізації електронів в рідкому або твердому діелектрику. Зниження потенційного бар'єру призводить до того, що досить потужна емісія електронів може виникати при локальних напруженостях порядку 5-105 В/см.

Авто-термоелектричну емісію можна вважати родоначальницею електронних процесів в рідких і твердих діелектриках, що визначають подальший розвиток ч.р. Руйнування діелектрика відбувається за рахунок енергії, накопиченої електронами в електричному полі і переданої молекулам і атомам діелектрика.

Енергія ч. р. витрачається на розвиток наступних процесів: розігрів обсягу газу або рідини включення і прилеглих до нього обсягів твердого діелектрика; збудження атомів газу або рідкого діелектрика відповідно при розвитку ч. р. в газі або рідині і пов'язане з цим процесом випромінювання; іонізацію атомів газу або рідини; бомбардування поверхні твердого діелектрика, що прилягає до області розвитку ч. р. або електродів (розрив молекулярних зв'язків, ерозію, структурні зміни); розширення каналу розряду.

При ч. р. в газовому включенні близько 30% енергії витрачається на розширення каналу розряду, до 25% — на випромінювання, 3-4% — на іонізацію, 6-8% — на бомбардування поверхні твердого діелектрика електронами. Експериментально показано, що при ч. р. в рідких діелектриках на випромінювання, що реєструється на відстані близько 1 см від місця виникнення ч.р., витрачається близько 0,1% всієї енергії розряду. Прямі дані про частку енергії, що перетворюється в тепло, відсутні. Як впливає з даних літератури, ця частка залежить від виду розряду і збільшується при зменшенні температури каналу розряду. Частина енергії витрачається на розширення каналу. Підрахунки показують, що на руйнування діелектрика витрачаються лише відсотки від загальної енергії розряду.

Незважаючи на великі відмінності в характері і ступеня руйнування різних матеріалів і видів ізоляції, можна висловити ряд положень, які є досить загальними, для органічних діелектриків.

Руйнування, що виникають в твердих і рідких діелектриках в відсутності кисню, зазвичай пов'язані з виділенням водню або з виділенням інших газів водневого походження — це можуть бути метан, вуглекислий газ і т.д. Можлива освіта вуглецевих сполук, в ряді випадків мають значну провідність — це можуть бути асфальтени, вуглецеві освіти типу дендритів (поверхневих дендритів і т.д.). У хлорованих діелектриках можливе виділення хлору, хлористого водню і їх похідних.

При руйнуванні полімерів розрядами в атмосфері азоту відбувається газовиділення, причому, наприклад, при впливі ч. р. на поліетилен 99% газу складається з водню. Була встановлена лінійна залежність між потужністю ч. р. $P_{чр}$ і швидкістю виділення водню v_{H_2} (Рисунок 2.9). Для оцінки стійкості полімерів до дії ч. р. пропонується ввести критерій K_p , причому:

$$K_p = P_{чр} / v_{H_2 \text{ від}} \approx n_{чр0} U_{чр0}^2 / v_{H_2 \text{ від}} \quad (2.77)$$

де $v_{H_2 \text{ від}}$ — відносна швидкість виділення водню, віднесена до 1% -ї концентрації водню в матеріалі; $n_{чр0}$ — число ч. р. в секунду з амплітудою $U_{чр0}$; $U_{чр0}$ — найбільш ймовірна амплітуда імпульсів ч. р. (вимірювалася в вольтях).

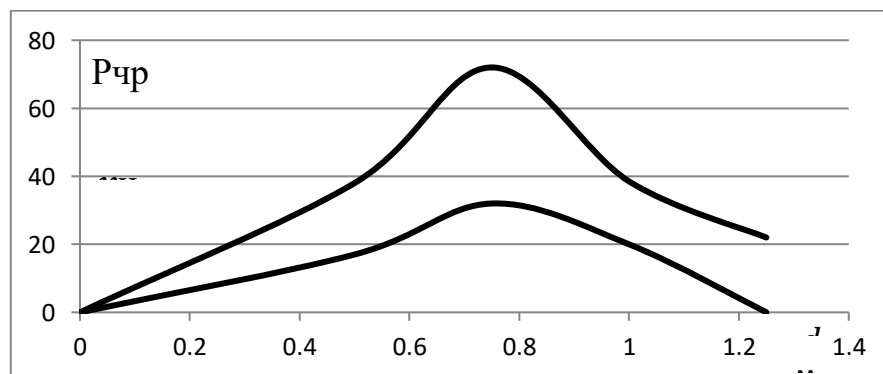


Рисунок 2.9. Залежність потужності ч. р. (1) і швидкості виділення водню (2) від товщини d_B газопрошарку.

2.7 Характеристики часткових розрядів, що визначає руйнування ізоляційних матеріалів.

Відповідно до загальним підходом до розгляду руйнувань ізоляції, визначальними повинні бути або енергія одиничного розряду або потужність розрядів.

Характеристики одиничного розряду є визначальними в тих випадках, коли може відбуватися активний обмін в середовищі діелектрика. Це характерно, наприклад, для композиції твердого та чималої кількості рідкого діелектрика, здатного інтенсивно циркулювати в ізоляційної конструкції. У цьому випадку продукти руйнування рідини, що виникають під дією розрядів малої інтенсивності, швидко ліквідовуються і не накопичуються в місці ч.р. При значній енергії одиничного імпульсу виникає руйнування вже в твердій фазі комбінованого діелектрика, що визначає подальший розвиток руйнування незалежно від властивостей рідини. Типовий приклад композиції такого типу — масло-бар'єрна ізоляція силових трансформаторів, для руйнування якої визначальною є енергія одиничного розряду. Ця енергія в ряді випадків може бути охарактеризована уявним зарядом одиничного розряду.

Якщо відбувається загальна зміна структури діелектрика, наприклад сильне газовиділення, насичення газом, або зміна хімічної структури, пов'язане з виділенням кислот, зі збільшенням $\tan \delta$, з можливістю розвитку теплового пробою, то необхідно мати на увазі, перш за все, потужність ч. р.

При поверхневій ерозії швидкість руйнування діелектрика пропорційна середньому струму ч. р, а не потужності. Це пояснюється тим, що тут визначальним є поверхневе вкладення енергії або поверхнева щільність енергії. Так як енергія кожної частки, яка бере участь в розряді, змінюється в обмеженому інтервалі, то загальна енергія або загальна потужність, що передається поверхні діелектрика, цілком визначається кількістю частинок, що потрапляють на поверхню; при цьому можна розглядати струм або щільність струму ч.р. як характеристики, що визначають ерозію і руйнування твердого діелектрика. Слід також зазначити, що при поверхневій ерозії частина енергії

ч.р. втрачається в газовому проміжку. Якщо канал розряду розташований в товщі твердого діелектрика або в рідкій фазі комбінованого діелектрика, коли енергія всього каналу бере участь в руйнуванні діелектрика, то перш за все необхідно враховувати енергію або потужність розрядів.

2.8 Енергетичні характеристики руйнування ізоляційних матеріалів

У розділі 2.7 показано, які характеристики ч.р. необхідно в першу чергу брати до уваги при розгляді руйнування діелектрика. Для кількісної оцінки ступеня руйнування потрібно також знати енергетичні характеристики діелектриків, що зв'язують енергію, передану речовини, і ступінь руйнування. Енергетична характеристика B має фізичний сенс кількості речовини, зруйнованої при впливі енергії розряду в 1 Дж і має розмірність $\Gamma/\text{Дж}$ або $\text{см}^3/\text{Дж}$.

Як енергетична характеристики може розглядатися коефіцієнт ерозії B_e , $\Gamma/\text{Дж}$, коли йдеться про руйнування полімерних матеріалів; коефіцієнт газостойкості B_r , $\text{см}^3/\text{Дж}$, коли мова йде про газовиділенні з твердих або рідких діелектриків; коефіцієнт B_k , $\Gamma/\text{Дж}$, при виділенні низькомолекулярних кислот; коефіцієнт B_x , $\Gamma/\text{Дж}$, що характеризує швидкість утворення продуктів ущільнення при розкладанні рідких діелектриків. Так, наприклад, коефіцієнт K_p у формулі (2.76) по суті є величиною, рівною $1/B_r$.

Таким чином, вважаємо за доцільне наступний підхід до встановлення зв'язку між інтенсивністю розрядів і руйнуванням ізоляції. Знаючи, з одного боку, енергію одиничного ч.р. або сумарну енергію великої серії довгоіснуючих розрядів і, з іншого боку, загальна кількість зруйнованого при цьому діелектрика, можна визначити кількість зруйнованої речовини або кількість речовин, отриманих внаслідок руйнування (розкладання) вихідного матеріалу, при розвитку ч. р. з енергією в 1 Дж.

Як приклад розглянемо енергетичні характеристики руйнування мінерального масла в паперово-масляній ізоляції. Як вже говорилося, перш за все під дією ч. р. відбувається руйнування молекул масла. Відомо, що мінеральне масло складається, в основному, з вуглеводнів трьох фракцій: парафінових, нафтинових і ароматичних. Під дією електронного бомбардування відчепляються атоми водню, в принципі, від молекул будь-який з цих фракцій. Поряд з відривом водню відбувається реакція гідрогенізації, тобто приєднання атомів водню. В реакції гідрогенізації беруть участь, в основному, молекули ароматичної фракції, мають бензольні кільця з подвійними (тобто ненасиченими) зв'язками між атомами вуглецю.

Якщо розглядати тільки процеси відриву водню, то, знаючи енергію зв'язку водню в молекулі парафіну, нафтену або ароматики, можна підрахувати кількість газу, який виділяється з масла при витраті енергії в 1 Дж. Енергія зв'язку C-H становить близько 100 ккал /моль, тобто близько 4 еВ.

Таблиця 2.1-Значення коефіцієнта ерозії B_e для плівкових полімерів і епоксидних компаундів.

Матеріал	$B_e, \text{мм}^3/\text{Дж}$	$B_e, \text{г Дж}$
Поліетиле.....	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-6}$
Поліетилентерефталат.....	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-6}$
Фторопласт-4.....	$5,7 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-5}$
Аральдит з затверджувачем.....	2×10^{-3}	2×10^{-6}
Аральдит з затверджувачем і наповнюваче.....	$5,9 \times 10^{-3}$	1×10^{-5}

За розрахунками під дією енергії в 1 Дж виділяється приблизно $3 \times 10^{-2} \text{ см}^3$ водню, а при визначенні експериментальним шляхом ця величина виявляється набагато менше. Дослідження, проведені на зразках ізоляції і в реакторах для визначення газостійкості масел, дали значення коефіцієнта газовиділення B_g , рівні $(1 - 3) \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{Дж}$. Значно менші, у порівнянні з

обчисленими, значення коефіцієнта B_r пояснюються, по-перше, тим, що на руйнування йде не вся енергія розрядів, а тільки менша її частина (решта енергії перетворюється в теплові коливання молекул діелектрика і йде на розширення каналу розряду) . По-друге, в маслі йдуть не тільки реакції розкладання, але і реакції гідрогенізації, інтенсивність яких збільшується зі збільшенням вмісту ароматики.

Експериментальні дані по визначенню терміну служби ізоляції на основі полімерів і епоксидних смол також показують, що можна пов'язати одиницю витраченої енергії до кількості зруйнованого діелектрика, тобто визначити коефіцієнт ерозії (табл. 2.1).

2.9 Вплив температури на електричне старіння ізоляції

Електричне старіння і руйнування діелектрика під дією ч. р. багато в чому пов'язано з хімічними процесами, що протікають в області розвитку ч. р. Це головним чином відноситься до хімічних реакцій, що протікають при впливі на діелектрик продуктів, що виникли в результаті ч. р., або реакцій мікро-радикалів, що утворилися під дією ч. р., з киснем газової середовища або іншими активними речовинами, що виникли в результаті ч. р. Швидкість протікання цих процесів визначається кінетикою хімічних реакцій.

Якщо позначити через A_0 початкове число молекул речовини в одиниці об'єму, а через A_t — те ж число молекул через проміжок часу t , то швидкість хімічних реакцій в більшості випадків може бути виражена формулою: $\left(-\frac{dA_t}{dt}\right) = K_t A_t$, де K_t — середня ймовірність розпаду однієї молекули в одиницю часу, що визначає швидкість хімічних реакцій.

Залежність швидкості реакції від температури підкоряється закону Арреніуса:

$$K_t = K e^{-W_a/(kT)}. \quad (2.79)$$

де K — постійна, що залежить від структури речовин, що вступають в реакцію; W_a — енергія активації; k — постійна Больцмана.

З останніх двох рівнянь з урахуванням початкових умов (при $t = 0$, $A = A_0$) отримуємо $A_t = A_0 e^{-K_t t}$.

Для органічної ізоляції інтенсивність хімічних процесів зазвичай зростає приблизно вдвічі зі збільшенням температури на кожні 10°C .

При старінні на постійній напрузі необхідно враховувати, що з ростом температури істотно зростає кількість ч. р. в одиницю часу і струм ч. р. Це призводить до збільшення потужності ч. р. і зниження терміну служби ізоляції. У зв'язку з цим при постійній напрузі з ростом температури зниження терміну служби відбувається як в результаті збільшення швидкості хімічних реакцій, так і в результаті збільшення потужності ч. р., Причому в різних умовах може сильніше проявлятися або одна, або інша причини. У зв'язку з викладеним, вплив температури на термін служби ізоляції сильніше позначається при старінні на постійній напрузі, ніж на змінній.

2.10 Визначення допустимих напруг

Допустимі напруги можуть визначатися наступними умовами надійної безаварійної роботи: 1) при робочій напрузі протягом необхідного терміну служби; 2) при впливі перенапруг (внутрішніх, грозових), що виникають на електрообладнанні в процесі експлуатації.

Як перша, так і друга умова можуть бути визначальними для вибору допустимих робочих напруг і габаритів ізоляційних конструкцій.

Перша умова пов'язана з процесами електричного старіння при тривалому впливі робочої напруги з тепловим режимом ізоляційної конструкції і визначає вибір допустимих робочих напруг. Якщо визначальними в процесі електричного старіння є ч. р., То робочі напруги вибираються на підставі допустимих характеристик ч. р. Якщо визначальними є теплові процеси, то

робочі напруги вибираються з міркувань відсутності неприпустимого перегріву ізоляції і відсутності можливості розвитку теплового пробою. В окремих випадках допустимі робочі напруги можуть визначатися електрохімічними процесами старіння (наприклад, електролітичні процеси при постійній напрузі).

Друга умова визначається головним чином короткочасною електричною міцністю і допустимою напругою при перенапруженнях визначаються з умов відсутності (або досить малої ймовірності) пробою ізоляції при очікуваному числі перенапруг певної амплітуди і форми. При цьому необхідно також враховувати, щоб вплив очікуваних перенапруг не приводили до незворотних змін в ізоляції, що знижує тривалу електричну міцність ізоляції. В цьому випадку допустимі напруженості можуть визначатися також допустимими характеристиками ч.р. при впливі перенапруг.

Розглянемо більш докладно вибір допустимих робочих напруг по характеристиках ч. р.

В цьому випадку допустимі робочі напруги визначаються за умовами допустимої інтенсивності ч. р. при заданому терміні служби. Для різних видів ізоляції і різних ізоляційних конструкцій визначальними можуть бути різні характеристики ч. р.

Для ізоляційних конструкцій, що містять рідкі діелектрики, схильні до інтенсивної циркуляції та обміну, визначальною характеристикою найчастіше є значення уявного заряду ч. р. Ця ж характеристика може бути визначальною, якщо виникнення ч. р. певної інтенсивності призводить до незворотних змін у твердій або комбінованій ізоляції і виникнення нового розвивається процесу руйнування ізоляції.

Для цих конструкцій допустимі робочі напруженості, а в ряді випадків і допустимі напруги при перенапруженнях визначаються умовою відсутності ч.р. з уявним зарядом певного небезпечного значення.

Для робочих напруженостей і напруг визначальними є характеристики початкових ч. р. Зазвичай в цих випадках допустима робоча напруженість $E_{\text{раб}}$ і аналогічно допустима робоча напруга $U_{\text{раб}}$ вибираються з умов:

$$E_{\text{раб}} = E_{\text{н}} - 3\sigma_{\text{нЕ}} \quad (2.80)$$

$$U_{\text{раб}} = U_{\text{н}} - 3\sigma_{\text{нU}} \quad (2.81)$$

де $E_{\text{н}}$ і $U_{\text{н}}$ — відповідно середні значення напруженості і напруги початкових ч. р. з уявним розрядом певного значення; $\sigma_{\text{нЕ}}$ і $\sigma_{\text{нU}}$ — середньоквадратичні відхилення напруженості і напруги зазначених початкових ч.р.

Формулами (2.80) і (2.81) можна користуватися при розподілі напруженості і напруги початкових ч. р., близьких до нормального, і обмеженому значенні коефіцієнта варіації $\sigma_{\text{нЕ}}/E_{\text{н}}$ або $\sigma_{\text{нU}}/U_{\text{н}}$, що не перевищує 0,15.

Для вибору допустимих випробувальних напруженостей $E_{\text{ісп}}$ і напруги $U_{\text{ісп}}$ можна виходити з умови допустимості при випробуваннях початкових ч. р., що не приводять до швидкого руйнування ізоляції, і не допускати критичних ч. р., що призводять до швидких незворотних змін. При цьому можна користуватися аналогічними формулами:

$$E_{\text{ісп}} = E_{\text{кр}} - 3\sigma_{\text{крЕ}} \quad (2.82)$$

$$U_{\text{ісп}} = U_{\text{кр}} - 3\sigma_{\text{крU}} \quad (2.83)$$

де $E_{\text{кр}}$ і $U_{\text{кр}}$ — відповідно середні значення напруженості і напруги критичних ч. р.; $\sigma_{\text{крЕ}}$ і $\sigma_{\text{крU}}$ — середньоквадратичні відхилення напруженості і напруги критичних ч. р.

Зазвичай функції розподілу напруженості або напруги критичних ч. р. досить добре відповідають нормальному закону, а коефіцієнти варіації $\sigma_{крE}/E_{кр}$ або $\sigma_{крU}/U_{кр}$ не перевищують 0,1.

Формули (2.81) - (2.83) відповідають ймовірності виникнення неприпустимих ч.р. при робочих або випробувальних напругах, що дорівнює приблизно 10^{-3} .

Якщо в ізоляції процеси руйнування діелектрика ч. р. накопичуються і поступово приводять ізоляцію до руйнування, причому в процесі їх розвитку практично аж до пробою або різкого зниження електричної міцності фізика і характер процесу руйнування ізоляції залишаються незмінними, то в цьому випадку визначальними характеристиками ч. р. є потужність або струм ч. р.

Як показують експерименти, допустима робоча напруженість в цих випадках визначається найчастіше ч. р. з інтенсивністю на рівні $10^{-14} - 10^{-15}$ Кл, що істотно ускладнює експериментальне визначення необхідних параметрів. У цьому випадку характеристики ч.р. на рівні $10^{-12} - 10^{-11}$ Кл (наприклад, напруга виникнення цих розрядів) не можуть характеризувати тривалу електричну міцність ізоляції і можуть з'явитися тільки фактом, яка контролюватиме стан ізоляції в цілому: відсутність грубих дефектів, якість технології виготовлення ізоляції, відсутність зволоження, розшарування і т.п.

В окремих випадках визначити допустимі напруженості електричного поля можна виходячи з термофлюктуаційної теорії.

2.11 Основні види часткових розрядів в силових трансформаторах.

У силових високовольтних трансформаторах застосовується, головним чином, масло-бар'єрна ізоляція, яка складається з шарів, що чергуються електрокартоном і нафтовим маслом. З цих двох компонентів при впливі змінної і імпульсної напруги найбільш навантажені масляні канали. Так,

наприклад, в області рівномірного поля співвідношення між напруженням в маслі E_M і в електрокартоні E_K дорівнює:

$$\frac{E_M}{E_K} = \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_M} \approx 2. \quad (2.84)$$

Так як електрична міцність масла в 3-4 рази менше міцності просоченого, електрокартону, то ч. р. виникають насамперед у прошарках масла.

У силових трансформаторах локальні підвищення напруженості електричного поля, достатні для виникнення ч. р., Можуть виникати в різних місцях, причому небезпека ч. р. певної інтенсивності істотно залежить від місця їх виникнення. Так, інтенсивні ч. р. у вигляді стримерної корони в чисто масляному проміжку (наприклад, з фланця прохідного ізолятора) при впливі робочої напруги або перенапруги представляють істотно меншу небезпеку, ніж аналогічні ч. р. в масло-бар'єрній ізоляції (наприклад, пробій масляного каналу), так як в останньому випадку ці ч. р. призводять до незворотних руйнувань твердої ізоляції. Крім того, ч. р. однакової інтенсивності, що виникають в різних місцях по довжині обмотки, призводять до різних реєструється значенням удаваного розряду внаслідок загасання сигналу при його проходженні по обмотці. Ці обставини істотно ускладнюють встановлення небезпечних рівнів ч. р. при різних впливах.

Можна виділити наступні види ч. р. в ізоляції силових трансформаторів:

- 1) пробою масляного каналу в масло-бар'єрній ізоляції середній частині обмотки;
- 2) пробою масляного каналу в області краю обмотки;
- 3) пробою масляного зазору в місці зіткнення ізольованого проводу та електрокартону або паперу (ізоляція відводів, перемичок, міжфазна ізоляція);
- 4) ч. р. в паперово-масляній ізоляції на відводах, перемичках і т.п.;
- 5) пробою масляного каналу між котушками (в поздовжньої ізоляції);
- 6) частковий пробій виткової ізоляції;

7) ковзний розряд по поверхні електрокартону.

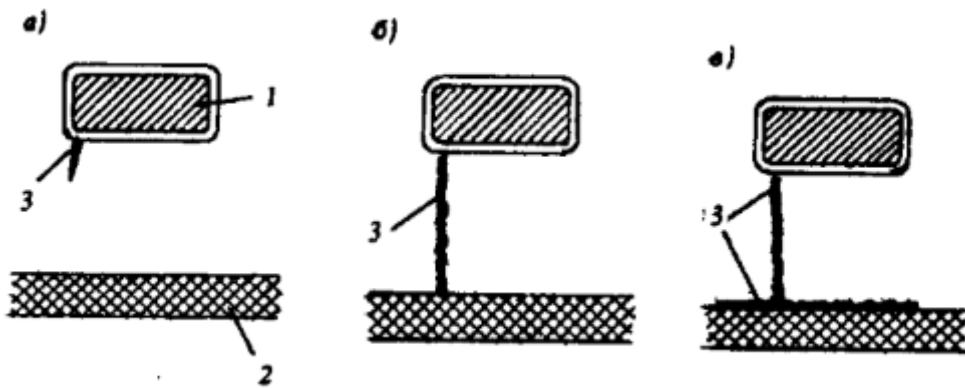


Рисунок 2.10. Схема розвитку пробую масляного каналу.

1 - обмотка;

2 - бар'єр; 3 - розряд.

Схема розвитку пробую масляного каналу приведена на Рисунок 2.10. Такий пробій найчастіше призводить до місцевих незворотних ушкоджень твердої ізоляції (обвуглені сліди на поверхні або в товщі твердої ізоляції електрокартону або паперу) і можливого подальшого розвитку цих ушкоджень. Для ізоляції трансформатора важливо не тільки збереження її ізолюючих властивостей в момент пробую масляного каналу, а й збереження її тривалої міцності в процесі подальшої експлуатації. Тому напруга, що приводить до пробую масляного каналу, прийнято ототожнювати з пробивною напругою масло-бар'єрної ізоляції, яка визначає її короточасну електричну міцність.

У головній ізоляції трансформаторів висока напруженість виникає біля поверхні проводу обмотки $E_{max} = (2 \div 2.5)E_M$, де E_M — напруженість в середині масляного каналу, яка визначається за формулою:

$$E_M = \frac{U}{r_{cp} \sum \frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}. \quad (2.85)$$

де $r_{\text{ср}}$ — радіус поверхні, що проходить через середину масляного каналу;
 r_i — радіус граничної поверхні i -го шару; ε_i — діелектрична проникність i -го шару.

У зв'язку зі значним спотворенням поля в першому масляному каналі, як правило, пробої настигають перш за все в цьому каналі, що розділяє обмотку і перший бар'єр з картону.

Характерними особливостями умов роботи масло-бар'єрної ізоляції в трансформаторах і реакторах є відсутність відкритих металевих поверхонь електродів в місцях найбільшої напруженості поля і відсутність гострих кромek і кутів на електродах. Тому початкові ч. р. локалізуються не у поверхні металу, а у поверхонь ізоляції, в першу чергу — в місцях стиків ізоляційних деталей. Іншим осередком початкових ч. р. є місця торкання бар'єрів і ізольованого проводу обмотки в переходах і перемичках. На Рисунок 3.2 показано виконання ізоляції у внутрішній поверхні обмотки і картина електричного поля в цьому вузлі.

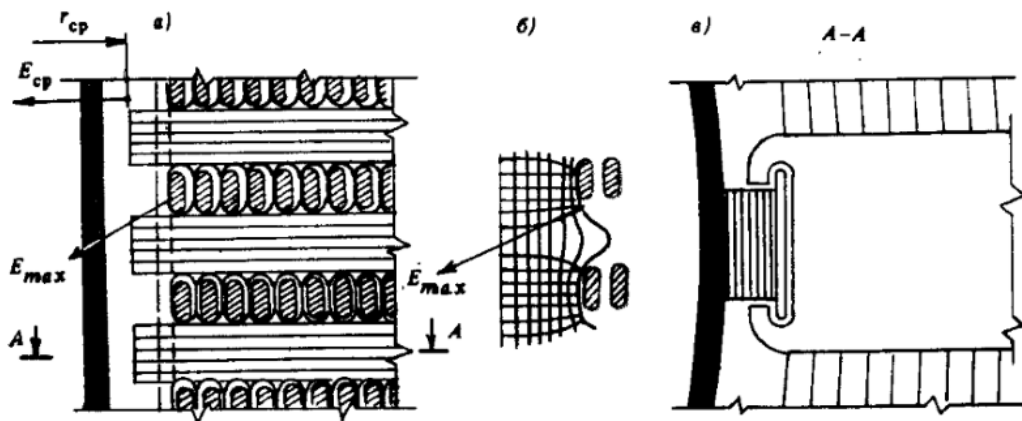


Рисунок 2.3. Ескіз виконання ізоляції у внутрішній поверхні обмотки (а) і картина електричного поля в масляному каналі поблизу обмотки (б).

2.12 Руйнування масло-бар'єрної ізоляції часткових розрядів

Електричне старіння масло-бар'єрної ізоляції полягає в тому, що в результаті початкових ч. р. малої інтенсивності відбувається розкладання масла, що супроводжується виділенням газу (головним чином, водню) і утворенням важких смолистих речовин, частково випадають з масла і осідають на поверхні ізоляційних деталей або на дні бака у вигляді чорного шламу. Освіта газу небезпечно тим, що він може накопичуватися в таких вузлах ізоляції, звідки вихід бульбашок є важким. З плином часу газовий міхур може досягти таких розмірів, що в ньому самому почнуться ч. р. високої інтенсивності, які сприятимуть подальшому газовиділенню і можуть зруйнувати тверду ізоляцію.

Інтенсивність слабких початкових ч. р. в масло-бар'єрній ізоляції лежить в межах від 10^{-12} – 10^{-10} Кл. Якщо ці розряди відбуваються навіть поблизу відкритої поверхні паперу і картону, з їх впливом на тверду ізоляцію можна не рахуватися. Вельми тривалий (протягом декількох років) вплив початкових ч. р. на папір і картон призводить тільки до відкладення на поверхні нерозчинного шламу. При цьому ізоляція залишається цілком працездатною.

Більш інтенсивні ч. р. на рівні 10^{-9} – 10^{-8} Кл найчастіше виникають при пробоях масляного прошарку, вузького масляного клина або газових бульбашок з діаметром більше 1 мм. Такі повторювані пробої викликають рясне газовиділення і розвиток ч.р. вздовж поверхонь картону або в його товщі. При цьому можлива поява сильно розгалуженого обвуглене каналу по поверхні або в товщі електрокартону, захоплюючого великі поверхні (десятки квадратних дециметрів) і отримав назву «повзе розряду». На Рисунок 2.13 приведена фотографія ізоляційної прокладки, що знаходилася в зоні розвитку такого розряду.

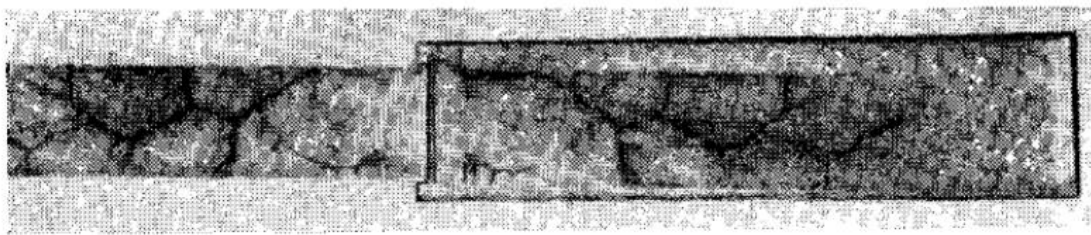


Рисунок 2.13 Фотографія прокладки зі слідами повзучого розряду.

Повзучий розряд розвивається, як правило, в вузькій щілині між двома притиснутими один до одного поверхнями ізоляційних деталей або в товщі електрокартону, між його шарами. Розрядний канал замикає вузький масляний зазор, наприклад між виступаючим переходом обмотаного ізоляцією проводом і картонним циліндром. Цей розрядний канал має високу температуру, при якій може виникнути обвуглювання картону вздовж каналу. Його можна розглядати як провідник, на кінці якого різко збільшується напруженість електричного поля і утворюються нові пробої в маслі, нове обвуглювання картону і т. д. Весь процес розвивається тривало і має пульсуючий характер: при пробі нові ділянки зростає струм, з ростом струму збільшується падіння напруги в каналі і падає напруга на кінці каналу, який просувається. При цьому поле в кінці слабшає і пробої масла припиняються. Відповідно зменшується падіння напруги на обвугленому картоні і знову зростає напруженість поля в кінці каналу розряду. Для просування повзучого розряду велике значення мають газові бульбашки, що утворилися у кінця каналу за рахунок розкладання масла. Енергія, передана електронами стримера молекулам рідини, витрачається в основному на збільшення кінетичної енергії молекул рідини, тобто на підвищення температури. Коли остання досягне температури кипіння, відбудеться місцеве закипання рідини і утворення високопровідного каналу лідера в газі (плазми) з дуже малим падінням напруги. Такий канал обмеженої довжини викликає різке збільшення напруженості поля у його межі і виникнення більш інтенсивних ковзаючих розрядів по поверхні ізоляційного бар'єру. Там, де канал розряду, що має

високу температуру, доторкається поверхні ізоляційного бар'єру (електрокартону, ізоляційної паперу), масло, яке просякнуло картон або папір, випаровується і утворюються білі пагони, зникаючі незабаром після припинення розряду.

Якщо енергія, що виділяється в каналі розряду, досить велика, то температура каналу може досягти 2-3 тис. градусів, в результаті чого на поверхні ізоляції, по якій розвивається розряд, виникають обвуглені сліди у вигляді гіллястих чорних пагонів.

Оцінимо інтенсивність ч. р., Що призводять до тих чи інших руйнувань на поверхні ізоляції.

Оскільки температура інтенсивної термічної деструкції картону лежить в інтервалі $275-400^{\circ}\text{C}$, можна прийняти температуру картону в місці пошкодження ч. р. рівній $350-380^{\circ}\text{C}$.

Енергія, необхідна для нагрівання картону в місці ч.р.:

$$W_T = m_K c_K \Delta T \quad (2.86)$$

де m_K — маса обвугленого картону; c_K — теплоємність картону; $\Delta T \approx 300\text{ K}$ — різниця температур.

Як показує аналіз пошкоджень ізоляції силових трансформаторів; сумарна, довжина обвуглених доріжок в початковій стадії руйнування приблизно дорівнює 1 см, перетин — біля 10^{-4} см^2 , а маса обвуглені картону — приблизно 10^{-4} г . Енергія, витрачена на нагрівання цього обсягу паперу на 300°C , становить $\sim 0,1\text{ Дж}$. Якщо припустити внаслідок короткочасності процес нагрівання адіабатичним і знехтувати тепловідводом від місця виникнення ч. р., то енергія ч. р., що призводить до обвуглювання прийнятого обсягу картону, дорівнює також 0,1 Дж. Для ізоляції силових трансформаторів класу 220 кВ це відповідає уявному заряду ч. р. $q_{\text{чр}} = 3 \times 10^{-7} — 10^{-6}\text{ Кл}$.

За експериментальними даними в силових трансформаторах при робочій напрузі мають місце ч. р. з уявним зарядом від 3×10^{-12} до $3 \times 10^{-9}\text{ Кл}$.

Аналіз показує, що тривале існування ч. р. з інтенсивністю $10\text{-п-}10 \sim 10$ Кл при робочому напрузі не призводить до помітних пошкоджень ізоляції і, очевидно, є безпечним. Тривале існування (протягом десятка годин і більше) ч. р. з інтенсивністю $10^{-11}—10^{-10}$ Кл призводить до появи слідів на картоні; кілька імпульсів з інтенсивністю $10^{-7}—10^{-6}$ Кл викликають обвуглювання картону.

2.13 Тривала міцність масло-бар'єрної ізоляції і допустимі напруженості

Визначення тривалої електричної міцності масло-бар'єрної ізоляції нашттовхується на значні труднощі. Це пов'язано з тим, що електрична міцність цієї ізоляції дуже слабо знижується зі збільшенням тривалості впливу. У зв'язку з цим незначне зниження напруги витримки призводить до різкого збільшення часу витримки до пробою.

На Рисунок 2.13 приведена залежність відносного значення, що ушкоджує напрузі від тривалості впливу, отримана на моделях масло-бар'єрної ізоляції типу МБІС і МБІК. Як випливає з цього малюнка, зниження напруги витримки на 10-15% нижче однохвилинної пробивної напруги призводить до збільшення часу витримки до пробою, (терміну служби) від 1 хв до 100 ч. При терміні служби від 10^{-1} с до десятків хвилин пробою каналу не підготовується попередніми ч. р. з інтенсивністю менше 10^{-7} Кл. На ділянці від десятків хвилин до 100 ч в ряді випадків при витримці моделей протягом $10^4—10^5$ с було відзначено зростання інтенсивності ч. р. в процесі витримки.

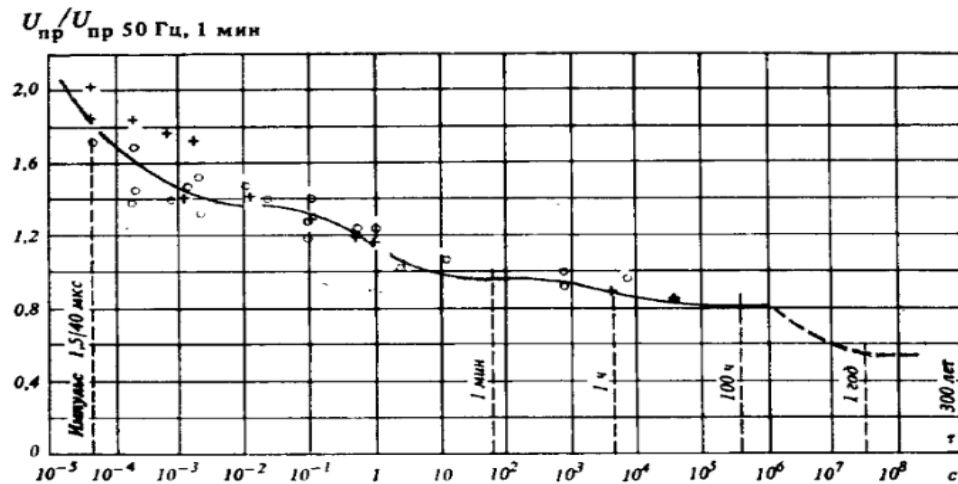


Рисунок 2.13 Залежність відносної ушкодженої напруженості від тривалості впливу.

Проте подальші випробування аналогічних моделей за часів витримки до 100 ч не підтвердили зростання інтенсивності ч. р. в процесі витримки і перед пробоем. За часів витримки від 1 хв до 100 ч порушення міцності масло-бар'єрної ізоляції не пов'язане з будь-якими тривалими, що готують процес пробую. За даними відносна міцність масло-бар'єрної ізоляції при часах витримки від 1 хв до 100 ч зменшується приблизно на 15%.

Для залежності $U_{пр}$ від часу витримки τ може бути запропонована формула:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{U_{пр1}}{U_{пр2}} \right)^a. \quad (2.87)$$

де, за даними різних авторів лежить в межах від 55 до 74.

При визначенні допустимих напруженостей електричного поля при короткочасних діях в ізоляції силових трансформаторів на підставі випробування моделей можна користуватися наступною методикою. За цією методикою в залежності $E_{мк пр min}$ вводиться поправочний коефіцієнт, що враховує невелику кількість дослідів, використаних для отримання цієї залежності; менші в порівнянні з реальним трансформатором розміри зразка (з урахуванням розподілу напруги по обмотці реального трансформатора і

обмеженості зони з граничними напруженням електричного поля); можливі відхилення в розмірах елементів ізоляції.

Інтервал між $E_{\text{мк пр min}}$ і напруженістю при однохвилинних випробуваннях напругою промислової частоти $E_{\text{ісп}}$ може бути прийнятий 15%, тобто $E_{\text{ісп}} = 0,85E_{\text{мк пр min}}$.

Наприклад, для конструкції ізоляції середини обмотки з масляним каналом 10 мм допустима напруженість в масляному каналі при однохвилинне впливі напруги 50 Гц дорівнює 70 кВ/см, при впливі внутрішніх перенапруг — 140 кВ/см і при впливі атмосферних перенапруг — 190 кВ/см. $E_{\text{ісп}}$ є допустимою сумарною напруженістю з урахуванням осьового поля обмотки, причому осьова складова напруженості повинна визначатися окремо, наприклад по картині поля обмотки для моменту часу, відповідного максимальній напрузі в найближчому до середини обмотки каналі.

Допустимі напруженості при короткочасних впливах можуть бути визначені також на підставі статистичного розкиду характеристик маслобар'єрної ізоляції. З достатнім ступенем надійності (більш 0,99) допустима напруженість може бути визначена за формулою:

$$E_{\text{ісп}} = k_s (E_{\text{мк пр}} - 3\sigma_E). \quad (2.88)$$

де $E_{\text{мк пр}}$ і σ_E — середня пробивна напруженість і середньо-квадратичне відхилення напруженості пробою масляного каналу; k_s — коефіцієнт, що враховує відмінність в площах електродів моделі і еквівалентного електрода для обмотки (з урахуванням розподілу напруги по обмотці).

З огляду на, що при однохвилинне додатку напруги 50 Гц в разі заземленої нейтралі в області досить високих напруженостей знаходиться приблизно 0,15 довжини обмотки, і приймаючи $\sigma_E / E_{\text{мк пр}} = 0,08$ маємо $E_{\text{ісп}} = 0,7E_{\text{мк пр}}$, що в підсумку практично збігається з рекомендаціями.

Допустима напруженість при робочій напрузі для масло-бар'єрної ізоляції в даний час може бути визначена орієнтовно, виходячи з ряду міркувань: відсутність ч. р. з удаваним зарядом більш 10^{-10} Кл, дослідження тривалої електричної міцності масло-бар'єрної ізоляції з урахуванням електротермоокислювального старіння, відсутність газовиділення в маслі (збільшення газомісткості масла) за рахунок процесів при впливу напруженості. Цим умовам відповідає допустима середня напруженість в масляному каналі від 30 до 50 кВ/см в залежності від ряду конструктивних і технологічних характеристик ізоляції.

2.14 Дослідження газів в маслі на основі пристрою HYDROCAL

HYDROCAL 1001 — Комбінований датчик газів в маслі.

Пристрій HYDROCAL 1001 це стаціонарно встановлюваний комбінований датчик газів в маслі, призначений для аналізу наступних розчинених в трансформаторному маслі ключових газів (ЗПКГ = Зважена повна концентрація горючих газів).

Ключові гази:

- Водень (H_2) приблизно 25 %
- Чадний газ (CO) приблизно 15 %
- Метан (CH_4) < 5 %
- Ацетилен (C_2H_2) приблизно 45 %
- Етилен (C_2H_4) приблизно 20 %
- Етан (C_2H_6) < 5 %

На підставі залучення майже всіх важливих ключових газів у зважену повну концентрацію газів HYDROCAL 1001 реагує незалежно від конкретної причини пошкодження.

Таким чином, він ідеальний, компактний і недорогий інструмент особливо для раннього виявлення пошкоджень.

Пристрій HYDROCAL 1001 обладнаний одним аналоговим виходом 4-20 mA для результату аналізу концентрації газів в маслі і 3 цифровими релейними виходами (аварійний сигнал Ні, аварійний сигнал Ні-Ні, несправність).

Основні переваги:

- Комбінований вимір водню (H₂), чадного газу (CO), метану (CH₄), ацетилену (C₂H₂), етилену (C₂H₄) і етану (C₂H₆).
- Комунікаційні інтерфейси ETHERNET 10/100 Мбит/с (мідний або оптоволоконний кабель) і RS 485 (протокол комунікації специфічний, MODBUS, підготовка до стандарту MEK 61850, DNP3, і т.д.).
- Конструкція приладу значно спрощена і габарити скорочені в порівнянні з іншими продуктами на ринку.

Загальні данні про прилад HYDROCAL:

Додаткове живлення: 88 В АС_{мін} ... 276 В АС_{макс};

Опція: 88 В DC_{мін} ... 390 В DC_{макс};

Енергоспоживання: макс. 250 ВА;

Корпус: алюміній;

Габарити: (Ш) 164 x (В) 164 x (Т) 170 мм;

Вага: приблизно 4 кг;

Температура зовнішнього середовища: -55°C ... +55°C;

Температура масла: -20°C ... +90°C;

Тиск масла: не більше ніж 800 кПа;

Підключення до клапану: DIN ISO 228: G 1½;

Опція: NPT 1½.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

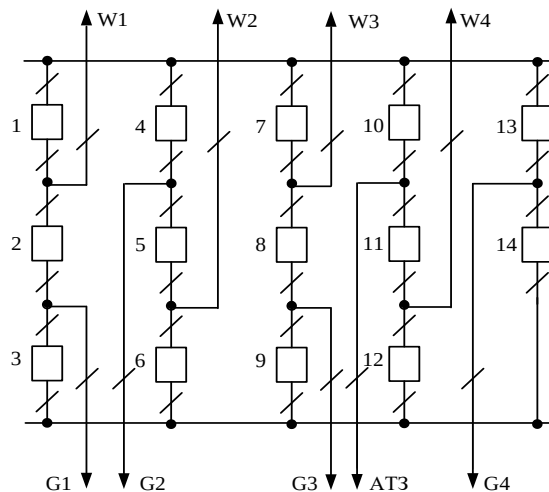
3.1 Техніко-економічне порівняння двох структурних схем

Сучасні ЕС – це складні технічні підприємства, вартість яких складає мільярди доларів. Через те забезпечення капіталовкладень при їх спорудженні має суттєве значення для будь-якої країни. Ефективність капіталовкладень в ЕС закладається на стадії її проектування. Очевидно, що кожне проектне рішення має бути оптимальним.

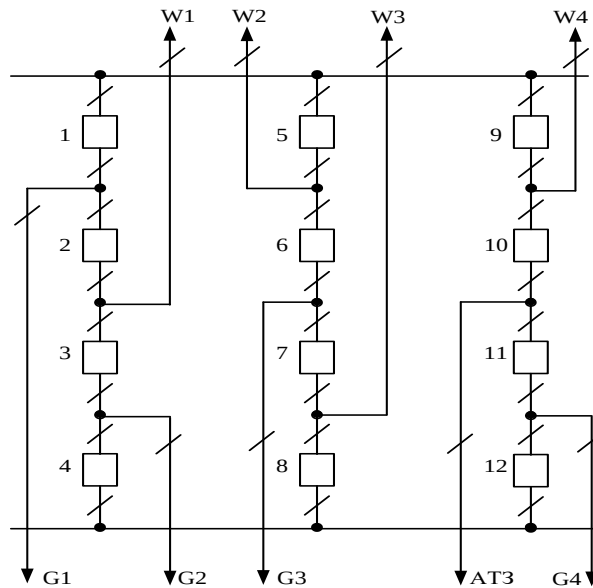
Оптимальне рішення – це рішення, яке задовольняє вимоги до якості об'єкта, що проектується, за мінімально можливих затрат матеріалів, фінансових і трудових ресурсів. Воно повинно бути отримане за комплексного розгляду об'єкта в цілому з урахуванням взаємозв'язків з його частинами.[]

Для вибору схеми електричних з'єднань РУ станції передбачається не менше ніж два конкурентоспроможних варіанти. Для ВРУ-500 кВ намічаємо два варіанти схем:

- а) схема дві системи збірних шин з чотирма вимикачами на три приєднання «3/2»;
- б) схема «4/2» .



а) I варіант



б) II варіант

Рисунок 3.1 – Схеми ВРУ-500 кВ

Для розрахунку використаємо дані, отримані з розрахунку в [1] розділі. Схему вибираємо за приведеними затратами (1.24):

Економічна доцільність схеми визначається за мінімальними приведеними затратами :

$$Z = p_n K + U + M(3); \quad (3.1)$$

Капіталовкладення K при виборі оптимальних схем видачі електроенергії визначаються за збільшеними показниками.

Якщо кількість трансформаторів в порівнювальних схемах однакова, то капіталовкладення в РУ оцінюються за числом комірок вимикачів:

$$K = n \cdot C_K; \quad (3.2)$$

$$U = \frac{a}{100} \cdot K, \quad (3.3)$$

де $p_n = 0,15$;

$M(3)$ – очікуваний збиток від перерви електропостачання.

n – число комірок з вимикачами;

C_k – вартість комірки, тис. грн.,

$a = 8,4\%$;

$$M(3) = y_0 \sum_j K_j \sum_i^n w_i \cdot \Delta P_i \Delta T_i, \quad (3.4)$$

де $y_0 = 15 \frac{\text{грн.}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$ – питомий збиток.

Розрахунок очікуваного збитку здійснюється формалізованим таблично-логічним методом. Суть розрахунку полягає у визначенні математичного очікування числа відключень елементів, які комутуються в РУ (ліній, трансформаторів, генераторів), розділень РУ на електрично незв'язані частини, а також тривалості вимушеного простою елементів, що відключаються.

Якщо варіанти відрізняються тільки кількістю і схемою з'єднання вимикачів, а кількість трансформаторних з'єднань і ЛЕП однакова, то в розрахунках очікуваного збитку враховуються тільки показники надійності вимикачів. Вихідними даними для розрахунку є параметри потоку відмов вимикачів РУ ω_1 та ω_2 , час відновлення вимикача T_v , що відмовив, періодичності μ та тривалості планових ремонтів T_p .

Таблиця 3.1 – Показники надійності елегазових вимикачів

Напруга, кВ	Складові параметра потоку відмов, 1/рік		Час відновлення T_v , год.	Частота планових ремонтів, μ , 1/рік	Тривалість планового ремонтів, T_p , год.
	ω_1	ω_2			
500	0,02	0,005	150	0,2	350

Розрахунок ведеться у вигляді таблиці в додатку А, де в лівому стовпці вписані елементи, наслідки відмов яких розглядаються, та відповідні параметри потоку раптових відмов, в верхньому рядку – вимикачі, що

ремонтуються, та відповідні коефіцієнти k_j режимів роботи РУ (k_0 або k_p).

Таблиця 3.2 – Дані для розрахунку надійності схеми ВРУ-500 кВ

Параметр	Розрахункова формула	Числове значення	
		I	II
Кількість комірок, шт.	n_k	14	12
Вартість комірки, тис. грн.	C_k	14000	14000
Параметр потоку раптових відмов генеральних та лінійних вимикачів	$\omega_{ГВ} = 0,6 \cdot \omega_1$	0,012	0,012
	$\omega_{ЛВ} = 0,6 \cdot (\omega_1 + \omega_2 \cdot 1/100)$	0,035	0,035
Коефіцієнти ремонтного K_p та нормального режимів роботи P_y	$K_p = \mu \cdot T_{\Pi}/8760$	0,007991	0,007991
	$K_0 = 1 - n_k \cdot K_p$	0,888128	0,904110
Час простою елемента, год.	T_0	1	1
	$T_{ВП} = T_B - T_B^2/2 \cdot T_{\Pi}$	118	118
Математичне очікування числа відмов генераторних та лінійних вимикачів в нормальному ремонтному режимах	$K_0 \cdot \omega_{ГВ}$	0,0106575	0,0108493
	$K_0 \cdot \omega_{ЛВ}$	0,0314397	0,0320055
	$K_p \cdot \omega_{ГВ}$	0,0000959	0,0000959
	$K_p \cdot \omega_{ЛВ}$	0,0002829	0,0002829

Очікуваний збиток через відмови вимикачів.

$$\begin{aligned}
 M(3)_I &= 15 \cdot [0,0106575(5 \cdot 1 \cdot 382,4) + 0,0314397(3 \cdot 1 \cdot 382,4) + \\
 &+ 0,0000959 \cdot (8 \cdot 1 \cdot 860,7 + 3 \cdot 1 \cdot 421,1 + 53 \cdot 1 \cdot 382,4 + 1 \cdot 118 \cdot 382,4) + \\
 &+ 0,0002829 \cdot (51 \cdot 1 \cdot 382,4 + 3 \cdot 118 \cdot 382,4 + 4 \cdot 1 \cdot 56 + 1 \cdot 1 \cdot 17,3)] = 1610,62 \text{ тис грн.} \\
 M(3)_{II} &= 15 \cdot [0,0108493(1 \cdot 1 \cdot 521,1 + 3 \cdot 1 \cdot 382,4) + 0,0320055(4 \cdot 1 \cdot 382,4) + \\
 &+ 0,0000959 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 899,4 + 1 \cdot 1 \cdot 860,7 + 11 \cdot 1 \cdot 421,1 + 1 \cdot 118 \cdot 421,1 + \\
 &+ 28 \cdot 1 \cdot 382,4 + 4 \cdot 118 \cdot 382,4) + 0,0002829 \cdot (2 \cdot 1 \cdot 860,7 + 3 \cdot 1 \cdot 421,1 + 1 \cdot 118 \cdot 421,1 + \\
 &+ 48 \cdot 1 \cdot 382,4 + 2 \cdot 118 \cdot 382,4 + 1 \cdot 1 \cdot 477,7 + 1 \cdot 1 \cdot 17,3)] = 2031,66 \text{ тис грн.}
 \end{aligned}$$

Таблиця 3.3 – Розрахункові показники надійності схеми ВРУ-500 кВ

Відмова елемента	P,МВт	Час простою, Т ₀ /Т _{ВП} , ГОД	К ₀		К _р	
			Ω _{ГВ}	Ω _{ЛВ}	Ω _{ГВ}	Ω _{ЛВ}
І варіант						
2G	860,7	1	—	—	8	—
		118	—	—	—	—
G+AT	421,1	1	—	—	3	—
		118	—	—	—	—
G; W+G; G+D(W, G) G+D(W,AT)	382,4	1	5	3	53	51
		118	—	—	1	3
2W	56	1	—	—	—	4
		118	—	—	—	—
W+D(W,AT)	17,3	1	—	—	—	1
		118	—	—	—	—
ІІ варіант						
G+D(G,AT)	899,4	1	—	—	1	—
		118	—	—	—	—
2G 2G+W	860,7	1	—	—	1	2
		118	—	—	—	—
G+AT; W+G+AT; W+D(G,AT); D(G,AT)	421,1	1	1	—	11	3
		118	—	—	1	1
2W, G; G; W+G; G+D(W,G); G+D(W,G,AT); G+D(W,AT); G+D(2W,G)	382,4	1	3	4	28	48
		118	—	—	4	2

Таблиця 3.4 – Приведені затрати схем ВРУ-500 кВ

Складові витрат	Числове значення, тис. грн..	
	І варіант	ІІ варіант
Капіталовкладення	196000	168000
Щорічні експл.	16464,0	14112,0

витрати		
Очікуваний збиток	1610,62	2031,66
Приведені затрати	47474,618	41343,657

$$\Delta Z = 13,8 \% > 5\% \quad (3.5)$$

Приймаємо II варіант схеми ВРУ-500 кВ – схему «4/3».

Висновок до третього розділу

Розрахунки довели економічну доцільність впровадження схеми «4/3» у якості ВРУ-500 кВ. Мінімальні приведені затрати схеми «4/3» відрізняються від затрат схеми «3/2» на 13,8%. Це означає, що обидва варіанта не потрапили у зону невизначеності (Z_1 та Z_2 відрізняються не більше, ніж на 5%). Остаточного вибираємо схему «4/3».

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В цьому розділі магістерської роботи досліджуються питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час діагностики головної ізоляції силових трансформаторів КЕС 2320 МВт. Аналізування потенційних небезпек проведемо за [1, 2] для оперативно-ремонтного персоналу КЕС. Під час діагностики головної ізоляції силових необхідно передбачати заходи із запобігання впливу на працівників таких шкідливих виробничих факторів: фізичних, хімічних і трудового процесу.

Отже, на персонал впливають такі фізичні, хімічні шкідливі фактори та фактори трудового процесу. Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо). Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил). Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

У розділі охорони праці потрібно дослідити такі питання як технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць, електробезпека, мікроклімат, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, виробничий шум, виробничі вібрації, психофізіологічні фактори, безпека в надзвичайних ситуаціях для працівників і для об'єкта проектування в цілому під час будівництва та після прийняття його в експлуатацію.

4.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації об'єкта

4.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць

Вимірювання опору ізоляції мегомметром в діючих електроустановках слід проводити тільки після виконання необхідних організаційних та технічних заходів щодо підготовки робочого місця. Вимірювати опір ізоляції мегомметром може один працівник з групою III. В тому разі, коли це вимірювання є складовою частиною робіт, обумовлювати його в наряді або розпорядженні не вимагається.

Вимірювання опору ізоляції мегомметром здійснюється тільки на вимкнених струмовідних частинах, з яких знято залишковий заряд шляхом попереднього їх заземлення. Заземлення зі струмовідних частин слід знімати тільки після підімкнення мегомметра.

У разі вимірювання мегомметром опору ізоляції струмовідних частин з'єднувальні проводи слід приєднувати до них за допомогою ізолювальних тримачів (штанг). В електроустановках понад 1000 В, крім того, необхідно користуватись діелектричними рукавичками.

Забороняється у разі проведення робіт з мегомметром доторкатися до струмовідних частин, до яких він приєднаний. Після закінчення робіт необхідно зняти зі струмовідних частин залишковий заряд шляхом їх короткочасного заземлення.

Приєднувати та від'єднувати прилади, що потребують розривання електричних кіл, які перебувають під напругою до 1000 В, необхідно після того, як напругу з цих кіл знято. Приєднання і від'єднання приладів, що не потребують розривання електричних кіл, допускається виконувати під напругою із застосуванням електрозахисних засобів.

У тому разі, коли потрібно вимірювати електричні параметри пристроїв, що перебувають під напругою до 1000 В, необхідно заземлити металевий корпус переносного приладу і застосувати спеціальні щупи або з'єднувальні провідники з ізолювальними рукоятками.

До проведення випробувань слід допускати лише тих працівників, які пройшли спеціальну підготовку та перевірку знань. Керівник робіт, крім того, повинен пройти стажування протягом місяця під контролем досвідченого працівника. Працівники, допущені до проведення випробувань, повинні мати запис у посвідченні про перевірку знань.

Випробування електрообладнання, в тому числі і за межами електроустановки (в недіючих електроустановках, на складах, території підприємства, в полі тощо), що проводяться з використанням пересувної випробної установки, слід виконувати за окремим нарядом на випробування. Наряд на випробування видає працівник, який прийняв рішення про необхідність їх проведення та має право видавати наряд.

Допуск до випробувань в електроустановках здійснює оперативний або оперативно-виробничий працівник, який має такі права. У недіючих електроустановках, на складах, території підприємств, у полі тощо допуск до випробувань здійснює керівник робіт за нарядом. Проведення випробувань під час монтажу або ремонту обумовлюється у рядку "Доручається" наряду. В електроустановках до 1000 В випробування допускається виконувати за розпорядженням.

Випробування проводить бригада, в якій керівник робіт повинен мати групу IV, член бригади - групу III, а працівник, виставлений для охорони, - групу II. До складу бригади, яка проводить випробування, можуть входити виробничі працівники, які залучаються до виконання підготовчих робіт та нагляду за обладнанням. До складу бригади, яка виконує ремонт або монтаж обладнання, для проведення випробувань можна залучати працівників налагоджувальних організацій або електролабораторії. В цьому разі керівництво випробуваннями здійснює керівник робіт або, за його вказівкою, працівник з групою IV зі складу працівників лабораторії чи налагоджувальної організації.

Допуск за нарядами, виданими на проведення випробувань та підготовчих робіт до них, слід здійснювати тільки після того, як інші

бригади, які працюють на обладнанні, що підлягає випробуванню, виведені з робочих місць та їхні наряди здані допускатчу. В електроустановках без місцевих оперативних працівників керівнику робіт дозволяється після виведення бригади залишити наряд у себе, оформивши перерву в роботі.

Випробну установку, обладнання, що випробовується, та з'єднувальні проводи між ними слід обгородити щитами, канатами тощо з плакатами "Випробування. небезпечно для життя!", повернутими назовні. Огородження встановлюють працівники, які проводять випробування.

У разі необхідності слід виставити охорону зі складу членів бригади з групою II для запобігання наближенню сторонніх осіб до випробної установки, з'єднувальних проводів та до обладнання, що випробовується. Члени бригади, які виставлені для охорони, повинні знаходитись зовні огороження та вважати, що випробне обладнання перебуває під напругою. Залишити пост ці працівники можуть тільки з дозволу керівника робіт.

Під час складання випробної схеми перш за все необхідно виконати захисне і робоче заземлення випробної установки і, якщо потрібно, захисне робоче заземлення корпусу обладнання, що випробовується. Забороняється проводити випробування пересувною установкою із заземлюванням її корпусу тільки за допомогою робочої схеми.

Корпус пересувної випробної установки необхідно заземлити окремим заземлювальним провідником з гнучкого мідного проводу з перерізом не менше ніж 10 кв.мм. Перед випробуванням слід перевірити надійність заземлення корпусу. Перед приєднанням випробної установки до мережі напругою 380/220 В вивід високої напруги необхідно заземлити. Переріз мідного проводу, що використовується у випробних схемах для заземлювання, не повинен бути менше ніж 4 кв.мм.

Приєднання випробної установки до мережі напругою 380/220 В слід здійснювати через комутаційний апарат з видимим розривом кола або через штепсельну вилку, що розміщені на місці керування установкою. Комутаційний апарат або слід обладнати утримуючим пристроєм, або між

рухомими та нерухомими контактами апарата слід встановити ізолювальну накладку. Провід або кабель, який використовують для живлення випробної установки від мережі напругою 380/220 В, необхідно захистити запобіжниками або автоматичним вимикачем, які встановлені у цій мережі. Підключати до мережі пересувну випробну установку повинні представники організації, що експлуатує цю мережу.

З'єднувальний провід між обладнанням, що випробовується, і випробною установкою спочатку необхідно приєднати до її заземленого виводу високої напруги. Цей провід слід закріплювати так, щоб запобігти його наближенню (підхльостуванню) до струмовідних частин, що перебувають під напругою, на відстань, меншу за зазначену в цих Правилах. Приєднувати та від'єднувати з'єднувальний провід до фази (полюса) обладнання, що випробовується, до жили кабелю дозволяється за вказівкою керівника випробувань тільки після їх заземлення, яке слід виконати або увімкненням заземлювальних ножів, або встановленням переносних заземлень, у тому числі спеціальних лабораторних з ізолювальними рукоятками.

Після закінчення випробувань керівник робіт повинен знизити напругу випробної установки до нуля, вимкнути її з мережі 380/220 В, заземлити високовольтний вивід установки та повідомити про це бригаду словами "Напругу знято. Заземлення встановлено". Тільки після цього слід перез'єднувати проводи або, у разі повного закінчення випробувань, від'єднувати їх від випробної установки та знімати огороження.

Встановлювати та знімати заземлення заземлювальною штангою на високовольтний вивід випробної установки, під'єднувати і від'єднувати проводи, що йдуть від випробної установки до обладнання, яке випробовується, необхідно у діелектричних рукавичках. У разі проведення випробувань та перез'єднань незаземлені частини випробного обладнання слід розглядати як такі, що перебувають під напругою. Після проведення

випробувань обладнання із значною ємністю (кабелі, генератори) з нього необхідно зняти залишковий заряд.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;
- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного

поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (покажчики напруги для фазування, покажчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [3], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що

виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

Керівники підприємств, установ, організацій та інші посадові особи несуть персональну відповідальність за виконання вимог цих Правил у межах покладених на них завдань та функціональних обов'язків згідно з чинним законодавством. Працівників, які обслуговують електроустановки, необхідно забезпечити усіма необхідними засобами захисту, навчити правилам користування цими засобами і зобов'язати застосовувати їх для створення безпечних умов праці.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні [6], де встановлена лінія, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Пб	15-29	70 при 25°C	0,2-0,5
Холодний	Пб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

Для забезпечення потрібних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [7]: утеплення фасаду будівлі, встановлення вентиляції приміщень.

4.2.2. Склад повітря робочої зони

В умовах, що розглядаються в роботі, можливим забруднювачем повітря може бути пил нетоксичний [6].

Характерні забруднюючі речовини для виробничого приміщення наведені в таблиці 5.2

Таблиця 4.2 – Характерні забруднюючі речовини для виробничого приміщення

Найменування речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони в роботі передбачені такі рішення [7]: робочі місця, де можливе виділення пилу та, обладнані вентиляційними пристроями, які повинні бути постійно готовими до роботи; будь-які порушення у системі вентиляції відображаються попереджувальними сигнальними пристроями; установки для кондиціонування повітря або механічні вентиляційні установки під час їх роботи не створюють для працівників протягів.

4.2.3 Виробниче освітлення

Штучне освітлення в будівлі запроектоване загальне, освітлення, за якого світильники розміщуються рівномірно у верхній зоні приміщення (загальне рівномірне освітлення). Нормовані значення виробничого освітлення наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	4	2,4

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [9] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Для забезпечення нормованого значення освітлення у проекті передбачено:

- використання природного та штучного освітлення;
- штучне освітлення повинне бути рівномірне та достатньо інтенсивне;
- світло не повинне створює різких тіней на місцях роботи, значних контрастів між освітленим робочим місцем і навколишньою обстановкою;
- штучне світло не створює зайвих відблисків у полі зору працівника.

4.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму, що розглядаються в роботі, для працівників є шум будівельних машин і механізмів. Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного (непостійного) широкосмугового (тонального) шуму наведено в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного (непостійного) широкосмугового (тонального) шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частотами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Основні виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму (поліпшення шумового клімату) в приміщенні проектом передбачено:

- раціональне розташування робочих місць;
- постійний контроль режиму праці і відпочинку працівників;
- обмеження застосування обладнання та використання робочих місць, що не відповідають санітарно-гігієнічним вимогам.

4.2.5 Виробничі вібрації

Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підосви ніг або сидниці).

На будівельному майданчику присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація діюча на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються роторні вагоноперекидачі, які відносяться до типу загальної вібрації. Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	ДБ	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ $2,10^{-2}$	ДБ
Загальні	$Z_o, Y_o,$	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

– динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;

– зміна конструктивних елементів машин.

4.2.6 Психофізіологічні фактори

Робота будівельно-монтажного персоналу є достатньо складною і потребує різних навичок та характеристик працюючого, тому і впливи від робіт різні і визначаються за Державними санітарними нормами та правилами «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості

трудового процесу» [1].

Важкість праці визначається за дод. 15 [1], звідки видно, що даний вид робіт за показниками важкості умов праці характеризується як допустимі умови праці.

- енергозатрати організму: при регіональному навантаженні (з переважною участю м'язів рук та плечового суглоба) для жінок - до 7800;

- загальні енергозатрати організму, Вт - до 290;

- робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної);

- нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: 51-100;

Напруженість праці визначається за дод. 16 [1], робота відноситься до інтелектуальної, і має наступні характеристики:

- зміст роботи: відсутня необхідність прийняття рішення;

- сенсорні навантаження : 51-75;

- розмір об'єкта розрізнення (при відстані від очей працюючого до об'єкта розрізнення не більше 0,5 м), мм, % часу зміни: 5,0-1,1 мм більше 50% часу;

- тривалість робочого дня, год. — 8 годин;

- змінність роботи - однозмінна робота (без нічної зміни).

Дані характеристики вказуються на те, що за напруженістю робота інженера-проектувальника (цивільне будівництво), який здійснює чисельне моделювання перерозподілу зусиль між елементами кущового пальового фундаменту в залежності від кількості паль відноситься до другого класу з допустимими умовами напруженості праці (напруженість праці середнього ступеня).

4.5 Безпека у надзвичайних ситуацій. Дослідження безпеки роботи електричної частини конденсаційної електростанції потужністю 2320 МВт в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Дія радіації на матеріали і деталі апаратури залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи випромінюваної речовини та умов навколишнього середовища.

Дослідження безпеки роботи станцій у надзвичайних ситуаціях мирного та воєнного часу має велике значення, тому що вона дозволяє не тільки оцінити можливі втрати, нанесені об'єкту, але й розробити комплекс заходів, направлених на підвищення його безпеки.

На проектованій конденсаційної електростанції з реакторами в технологічному процесі використовуються: напівпровідники, метали та діелектрики. Серед цих матеріалів метали та напівпровідники найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Після проходження γ -випромінювань через елементи РЕА (трансформатори, промислове обладнання) в них виникає хибний імпульс, який може призвести до пошкодження приладів. Також наслідком такого опромінення зменшується опір, в газорозрядних приладах, збільшується провідність металу та витоки струму.

Приймачами ЕМІ являються предмети, які проводять електричний струм: лінії електропередач, управління, конденсаторні батареї, кабельні лінії, системи релейного захисту. Апаратура, яка не оснащена спеціальним захистом може бути пошкоджена внаслідок ЕМІ.

У випадку з атомною електростанцією все це може призвести до аварії з непоправними наслідками, яскравим прикладом якої стала аварія на ЧАЕС. Саме тому Дослідження безпеки роботи конденсаційної електростанції є дуже важливою та актуальною.

4.5.1 Дослідження безпеки роботи електричної частини конденсаційної електростанції у випадку радіаційного зараження території.

Вихідні дані: $K_{осл}=5$.

Проводимо аналіз боку керування для щитка управління і визначимо радіоелектронні елементи, від яких залежить її функціонування: резистори, мікросхеми, транзистори діоди, конденсатори.

Таблиця 4.1 – Граничні значення експозиційних доз

№	Блоки елементів	Блок системи	Елементи КЕС	$P_{гр}, P/год$	$P_{гр}, P/год$
1	Система зберігання даних	МПК	Резистор СП1-10, мікросхема DA3247	10^6 10^5	10^5
		Блок пам'яті	Мікросхема K1553ЛА, мікросхема DA3247	10^5 10^5	
2	Дистанційний пульт керування	Процесорний блок	Транзистор СП1-10, мікросхема K1553ЛА, мікросхема DA3247	10^4 10^5 10^5	10^4
		Блок живлення	конденсатор К-41, діод VD648, транзистор КТ847	10^6 10^7 10^4	
		Блок відображення	Транзистор КТ531, фотодіод LEDX55	10^4 10^4	
3	Система зв'язку	Блок прийому і передачі	Мікросхема DA4131, резистор СП45	10^5 10^7	10^4
		Оптична	Фотоелемент DP3М,	10^6	

		система	транзистор ГТ500, діод VD648	10 ⁵ 10 ⁵	
--	--	---------	---------------------------------	------------------------------------	--

За мінімальними значеннями потужності експозиційної дози гамма-випромінювання (P_e) та коефіцієнтом послаблення радіації ($K_{осл}$) визначається граничне значення експозиційної дози гамма-випромінювання (D_e) електричної частини конденсаційної електростанції в цілому.

З наведеної таблиці слідує, що мінімальні значення потужності дози, при яких в елементній базі можливі необоротні зміни мають транзистор КТ847 блоку живлення, фотодіод LEDX55 та транзистор КТ531 блоку відображення, а також транзистор ГТ500 і діод VD648 системи зв'язку – $P_{гр}=10^4$, при $t_k=60000$ год, $k_{посл}=2$.

Визначаємо максимальний рівень радіації:

$$P_{1\max} = \frac{P_{гр} \cdot k_{посл}}{2 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}. \quad (5.1)$$

Підставивши відповідні числові значення в формулу (5.1) отримаємо:

$$P_{1\max} = \frac{10^5 \cdot 2}{2 \cdot (\sqrt{60000} - \sqrt{1})} = 410 \text{ (Р/год)}.$$

Визначаємо допустимий час роботи електричної частини станції:

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{P_{\text{гр}} \cdot k_{\text{посл}} + 2 \cdot P_{1.\text{max}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{2 \cdot P_{1.\text{max}}} \right)^2 = \left(\frac{10^5 \cdot 2 + 2 \cdot 410 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 410} \right)^2 = 59977 \text{ (год)}.$$

Таким чином, допустимий час роботи електричної частини конденсаційної електростанції складатиме 59977 годин або 6 років 309 днів 1 годину при максимальному рівні радіації 410 Р/год. Отже, електрична частина конденсаційної електростанції буде працювати з потрібною якістю, якщо $P_{\text{гр}} \leq 10^4$ Р/год, а час перебування не перевищує $t_{\text{доп}} = 6,827$ (років).

4.5.2 Дослідження безпеки роботи електричної частини конденсаційної електростанції в умовах дії ЕМІ

Вихідні дані: $U_{\text{ж}} = 220 \pm 5\% \text{ В}$; $l_{\text{В}} = 0,08 \text{ м}$

В якості критерію безпеки роботи РЕА в умовах дії електромагнітного випромінювання приймається коефіцієнт безпеки, який визначається за формулою:

$$K_6 = 20 \lg \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{г}}} \geq 40 \text{ (дБ)}, \quad (5.2)$$

де $U_{\text{д}}$ – допустиме коливання напруги живлення, 220 В;

$U_{\text{г}}$ – напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Допустимі коливання напруги живлення:

$$D_d = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 231 \text{ (В)}.$$

В зв'язку з тим, що окремі елементи систем можуть мати різні значення коефіцієнтів безпеки, то стійкість роботи електричної частини конденсаційної електростанції в цілому визначається мінімальним значенням коефіцієнта безпеки.

З рівняння (5.2) визначаємо:

$$U_r = \frac{U_d}{10^2} = \frac{231}{100} = 2,31 \text{ (В)}.$$

Приймемо максимальну довжину горизонтальних струмопровідних частин $l_r=0,83$ м. Тоді вертикальна складова напруженості електричного поля визначається за формулою:

$$U_r = E_v \cdot l_r. \quad (5.3)$$

Звідси:

$$E_v = \frac{U_r}{l_r} = \frac{2,31}{0,83} = 68,78 \text{ (В/м)}.$$

Таким чином було знайдено допустимі складові горизонтальної та вертикальної напруженості електромагнітного поля, при яких коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого, забезпечується безпечна робота РЕА станції в умовах дії ЕМП.

4.5.3 Розробка заходів по забезпеченню безпечної роботи електричної частини конденсаційної електростанції потужністю 2320 МВт в умовах надзвичайних ситуацій

Отже в даній частині розділу було проведено дослідження безпеки роботи електричної частини конденсаційної електростанції в умовах дії іонізуючих та ЕМІ.

Розглянемо способи підвищення безпеки роботи електрообладнання.

Основними способами захисту від випромінювання є: розміщення апаратури в спорудах, побудованих з негорючих матеріалів, або обробка спалимих матеріалів захисними складами; заміна горючих елементів на вогнетривкі; постачання світлоприймача апаратури закритими світлопроводами або захист їх корпусу для зменшення ймовірності прямого впливу світлового випромінювання; постачання апаратури системою автоматичної вентиляції для підтримки температури всередині блоків на допустимому рівні.

Для захисту апаратури від ЕМІ застосовуються різної конструкції екрани і кожухи. Найважливіші вимоги до матеріалів, з яких виготовляються захисні пристрої, такі: до складу матеріалів повинні входити елементи з великою атомною масою; захисні матеріали повинні включати легкі елементи.

Для підвищення безпеки роботи електрообладнання в умовах дії ЕМІ застосовують: раціональне просторове розміщення вузлів і схем системи; вибір найбільш стійких до впливу ЕМІ функціональних елементів систем; створення стійких електронних схемних рішень; застосування заходів спеціального захисту; зміна порядку функціонування системи при подачі сигналу повітряної тривоги.

ВИСНОВКИ

В проекті розглянуто питання проектування електричної частини КЕС потужністю 2320 МВт, яка має зв'язок з енергетичною системою по чотирьом ЛЕП-500 кВ, а з районом – по трьом ЛЕП-220 кВ.

В проекті виконано розрахунок графіків електричних навантажень, вибір силового обладнання, структурної схеми станції, схем ВРУ різних напруг, схеми власних потреб, комутаційної апаратури, струмопровідних частин, вимірювальних трансформаторів, засобів обмеження перенапруг, а також заземлення ВРУ-500 кВ.

Таким чином, ми ознайомилися з методикою проектування електричної частини сучасних КЕС.

В магістерській кваліфікаційній роботі викладені теоретичні основи одного із сучасних методів діагностики ізоляції масло наповненого обладнання — характеристик часткових розрядів в маслобар'єрній ізоляції. Цей метод дозволяє виявити дефекти без виводу трансформаторів з роботи, тобто під робочою напругою. Умови отримання характеристик часткових розрядів в цьому випадку є найбільше інформативними: трансформатор під навантаженням, температура ізоляції установлена робоча. Це значно підвищує ефективність виявлення дефектів на ранній стадії розвитку.

1. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шидловський А.К. Проблеми електроенергетики України // Технічна електродинаміка. Тем. Випуск. 2006. – С. 3-7.
2. Лежнюк П. Д. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник / П. Д. Лежнюк, В. М. Лагутін, В. В. Тептя. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 194 с.
3. Лагутін В. М. Власні потреби електричних станцій: навчальний посібник / В. М. Лагутін, В. В. Тептя, С. Я. Вишневський. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 102 с.
4. Двоскин Л. Н. Схемы и конструкции распределительных устройств / Л. Н. Двоскин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 220 с.
5. Собчук В.С., Лук'яненко Ю.В., Леонтьев В.О. Методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни "Техніка високих напруг." Вінниця: ВДТУ, 1998.- 19с. Укр. мовою/.
6. Собчук В.С. Методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни "Технологія робіт під напругою." Вінниця: ВДТУ, 2001.- 20с. Укр. мовою/.
7. Собчук В.С. Техніка та електрофізика високих напруг. [Лабораторний практикум]. Вінниця: ВДТУ, 2002.- 81с.
8. Собчук В.С. Електроматеріалознавство. [Навчальний посібник]- Вінниця: ВДТУ, 2002.- 73с.
9. ІЕС 60076-1:1993—03 Трансформатори силові. Частина 1: Загальні положення. Перша редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
10. ІЕС 60076-2: 1993—03 Трансформатори силові. Частина 2: Нагрівання. Друга редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
11. ІЕС 60076-3: 1993 — 03 Трансформатори силові. Частина 3: Рівні міцності ізоляції та її випробовування на пробій. Друга редакція.

- Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
12. IEC 60599:1999 Експлуатаційне електрообладнання, заповнене мінеральним маслом — керівний документ по інтерпретації аналізів розчинених та вільних газів. Друга редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1999 р.
 13. IEC 61198:1993 Мінеральні ізоляційні масла — Методи визначення 2-фурфуролу та похідних компонентів. Перша редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
 14. Матеріали робочої групи 15/12-01-11 СІРЕ «Останні розробки в інтерпретації результатів ХАРГ». «ЕІ_ЕСТРА». Жовтень 1999. №186 90
 15. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
 16. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
 17. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.
 18. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
 19. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
 20. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих

- приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
- 21.ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
- 22.ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
- 23.ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
- 24.ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
- 25.Кодекс цивільного захисту України. К.: ВР України, 2012. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ
РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ
ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Електрична частина конденсаційної електростанції потужністю 2320 МВт з дослідженням методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність _____ Схожість _____

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☐ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _____ Вишневський С.Я.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи _____ Качалка М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Собчук Н.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б

Технічне завдання МКР

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

(підпис)

" ____ " _____ 20__ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

Електрична частина конденсаційної електростанції потужністю 2320 МВт з
дослідженням методів діагностики головної ізоляції силових
трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів
08-21.МКР.011.00.005 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н.

(підпис) Собчук Н.В.

Магістр групи ЕС-22мз

(підпис) Качалка М.М.

Вінниця 2024 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) актуальність досліджень обумовлена тим, що більшість основного обладнання електричних станцій в Україні відпрацювала свій термін роботи. 96 % обладнання ТЕС відпрацювало свій проектний ресурс, 73 % – перевищило граничний, застарілість обладнання може привести виходу з робочого стану обладнання станції, що в свою чергу призводить до позапланового, автоматичного відключення споживачів, дефіциту потужності і розвалом енергосистеми. Виходом є реконструкція існуючих та будівництво нових електростанцій. Завданням дипломної роботи є проектування електричної частини конденсаційної електростанції (КЕС). Головною особливістю конденсаційних електричних станцій є те, що в них забезпечуються умови максимально повного перетворення енергії пари, виробленої у котлі, шляхом максимально можливого розширення її у робочих циліндрах турбіни у механічну енергію обертання ротора турбогенератора, а потім в електричну енергію. Найважливішою умовою, яка визначає місце будівництва КЕС є наявність джерела водопостачання;

б) наказ ректора ВНТУ № 81 від 11 березня 2024 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

а) мета – Проектування електричної частини конденсаційної електростанції з дослідженням комутаційного обладнання;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

1. План розвитку системи передачі на 2020-2029 роки. Постанова НКРЕКП № 764 від 03.04.2020. 377 с.

2. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 194 с.

3. Гук Ю. Б., Кантан В. В., Петрова С. С. Проектирование электрической части станций и подстанций. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 312 с.

4. Технічні вимоги до виконання МКР

Передбачається спорудження електричної станції у західному регіоні України.

– технічне завдання: Проектування електричної частини конденсаційної

електростанції з дослідженням методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів 2320 МВт (2x160+4x500); максимальне навантаження місцевого району 250 МВт; напруга мережі району 220 кВ; максимальна потужність, що віддається в систему 1600 МВ; відстань до місця приєднання до енергосистеми 780 км.

– елементна база: електротехнічне обладнання, що має бути встановлено на ТЕС, українського та зарубіжного виробництва (“Південномаш”, “Рівненський завод високовольтної апаратури”, “ABB” та ін.)

– конструктивне виконання: компоновку та головну схему електростанції виконують згідно прийнятої системи використання енергії водотоку (оригінальне рішення).

– показники технологічності: проектування КЕС, монтаж та експлуатація електрообладнання мають виконуватися відповідно до вимог ПУЕ та ПТЕ.

– технічне обслуговування і ремонт: експлуатація, технічне обслуговування та ремонт обладнання буде здійснювати оперативний та ремонтний персонал станції.

– живлення об’єкта: для забезпечення надійного живлення споживачів власних потреб ЕС виконати проектування резервного живлення.

5. Економічні показники

Визначити основні техніко-економічні показники роботи електростанції і на основі їх аналізу зробити висновок про доцільність спорудження такої станції.

6. Етапи МКР та очікувані результати

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		При- мітка
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	16.01.24	18.01.24	
2	Техніко-економічне обґрунтування проектування КЕС	19.01.24	08.02.24	
3	Електротехнічна частина	09.02.24	22.02.24	
4	Дослідження методів діагностики головної ізоляції силових трансформаторів з урахуванням характеристик часткових розрядів	23.02.24	27.02.24	
5	Економічна частина	28.02.24	05.03.24	
6	Оформлення пояснювальної записки	06.03.24	17.04.24	
7	Виконання графічної/ілюстративної частини та оформлення презентації	19.04.24	30.04.24	
8	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР			
9	Рецензування МКР			
10	Захист МКР			

7. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук рецензента, протоколи складання державних іспитів, анотації до МКР українською та іноземною мовами.

8. Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії, затвердженою наказом ректора.

9. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:2, 2021р.

10. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом

Відсутні.

