



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту

О. А. Савченко

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І ПІДСТАНЦІЇ

Конспект лекцій
Частина 2

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форми навчання
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Харків
2024

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту

О. А. Савченко

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І ПІДСТАНЦІЇ

Конспект лекцій
Частина 2

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форми навчання зі спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Затверджено рішенням
науково-методичної ради
факультету енергетики,
робототехніки та комп'ютерних
технологій
Протокол № 3
від 26 грудня 2024 року

Харків
2024

УДК 621.31

С 31

Схвалено на засіданні кафедри
електропостачання та енергетичного менеджменту
Протокол №4 від 11.12.2024 р.

Рецензенти:

Н. Г. Косуліна, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ;

Ю. М. Хандола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

С 31 Електричні станції і підстанції: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Частина 2. / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: О. А. Савченко – Харків: [б. в.], 2024. – 142 с.

Конспект лекцій з дисципліни «Електричні станції і підстанції» складений відповідно до програми навчальної дисципліни. В частині другій конспекту лекцій висвітлені питання коротких замикань та їх впливу на електричні апарати та провідники, призначення та принципу дії основної та допоміжної апаратури електричної частини електричних станцій і підстанцій.

Видання призначена для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.31

Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник, д-р техн. наук

© Савченко О. А., 2024

© ДБТУ, 2024

ЗМІСТ

Вступ	4
Мета та завдання вивчення дисципліни	6
Змістовий модуль 3. Особливості роботи електрообладнання електричних станцій та підстанцій. Комутаційні апарати. (ЗМ3)	7
Тема 1. Короткі замикання та їх вплив на електричні апарати та провідники	7
Тема 2. Нагрівання струмоведучих частин	20
Тема 3. Методи обмеження струмів коротких замикань	33
Тема 4. Електричні контакти	39
Тема 5. Електрична дуга та методи її гасіння	54
Тема 6. Електричні апарати напругою до 1 кВ	68
Тема 7. Роз'єднувачі, короткозамикачі та відокремлювані. Вимикачі навантаження. Запобіжники	75
Тема 8. Високовольтні вимикачі	81
Змістовий модуль 4. Вимірювальні трансформатори. Головні схеми та розподільні пристрої. Системи живлення, керування та заземлення підстанцій (ЗМ4)	87
Тема 9. Вимірювальні трансформатори струму	87
Тема 10. Вимірювальні трансформатори напруги	91
Тема 11. Схеми головних з'єднань електричних станцій та підстанцій	96
Тема 12. Розподільні пристрої електричних станцій та підстанцій	107
Тема 13. Установки оперативного змінного й випрямленого струму	117
Тема 14. Системи керування електростанцій та підстанцій	123
Тема 15. Системи заземлення підстанцій	135
Перелік літератури	141

ВСТУП

Рівень розвитку енергетики і електрифікації в найбільш опосередкованому вигляді відображає досягнутий техніко-економічний потенціал будь-якої країни. Енергетика забезпечує електроенергією і теплом промислові підприємства, сільське господарство, транспорт, а також комунально-побутові потреби населення.

Електрифікація чинить визначальний вплив на розвиток всіх галузей господарства країни. Прагнучи своєї економічної незалежності і безпеки, країна зобов'язана турбуватися, щоб темпи розвитку електроенергетики, зокрема її найважливішої ланки - генерувальних потужностей, були випереджувальними.

Основою електроенергетики України є об'єднана енергетична система (ОЕС), яка є одним з найпотужніших енергооб'єднань Європи. Загальна електрогенерувальна потужність становить 52,9 млн. кВт, з яких потужність ТЕС (thermoelectric power plant) складає 58 %, АЕС (atomic power plant) - 26 %, ГЕС (hydraulic power plant) та ГАЕС - 9 %, блок-станцій та інших джерел - 7%. Відповідно до розробленої Стратегії розвитку паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) - у 2030 р. величина генерувальних потужностей становитиме понад 70 млн. кВт.

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.

Забезпечення стабільного функціонування ОЕС України в умовах недостатності маневрових генерувальних потужностей і високої долі базової потужності є одним з найбільш проблемних питань. Тому для вирішення проблеми істотного поліпшення структури генерувальних потужностей необхідне введення нових мобільних потужностей, які забезпечать оптимальну роботу ОЕС

(цю функцію виконують ГЕС та ГАЕС, потужність яких на даний час становить тільки 9 % при необхідних 15-20 %).

В умовах рівнинних річок можливості будівництва великих ГЕС в Україні практично вичерпані, тому подальший розвиток гідроенергетики пов'язаний саме з модернізацією існуючих ГЕС та спорудженням ГАЕС.

Значна частина основного обладнання електричних станцій та підстанцій України відпрацювала встановлений стандартами термін їх роботи. 96 % обладнання ТЕС відпрацювало свій проектний ресурс, 73 % - перевищило граничний. Майже всі АЕС України повністю відпрацюють свій розрахунковий ресурс до 2026 року.

Тільки на основі сучасного енергообладнання електроенергетику України можна вивести на світовий рівень, який би забезпечив високу ефективність, надійність (reliability) та безпеку функціонування при екологічній сприйнятості всього ПЕК України, а також інтеграцію ОЕС України з енергосистемами країн сходу і заходу.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Мета вивчення дисципліни:

- засвоєння необхідного обсягу теоретичних знань з курсу електричних станцій і підстанцій;
- оволодіння вміннями і навичками, потрібними в процесі виробничої діяльності майбутнього інженера-енергетика.

Завдання – знайомство з технологією виробництва електричної енергії, вивчення конструкції сучасного електричного обладнання, умов його вибору та застосування в схемах електричних станцій та підстанцій, набуття знань зі схемних та конструктивних рішень електричних станцій та підстанцій.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ. КОМУТАЦІЙНІ АПАРАТИ (ЗМЗ)

ТЕМА 1. КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ТА ПРОВІДНИКИ

План

1. Види причини та наслідки к.з.
2. Процеси в електроустановках при виникненні к.з.
3. Електродинамічна та термічна дія струмів к.з. на електричні апарати
4. Розрахункові умови для перевірки електричних апаратів за режимом к.з.

1. Види причини та наслідки к.з.

Коротким замиканням називається порушення нормальної роботи електроустановки, викликане замиканням фаз між собою, замиканням фаз на нульовий провід, а також замиканням фаз на землю в мережах з глухим заземленням нейтралі.

Короткі замикання (КЗ) є найнебезпечнішим видом перехідних процесів у СЕП, тому що супроводжуються різким збільшенням струму. Знання величини струму КЗ необхідно для правильного вибору електроустаткування й уставок релейного захисту.

Розрізняють наступні види коротких замикань:

1. Трифазне симетричне КЗ, що виникає при одночасному замиканні всіх трьох фаз (мал. 1).

Відносна ймовірність цього виду КЗ від загального числа 1-7 %. Діюче значення періодичної складової трифазного симетричного КЗ

$$I^{(3)} = \frac{U}{Z_1}, \quad (1)$$

де U – напруга фази джерела живлення; Z_1 – опір прямої послідовності короткозамкненого ланцюга СЕП.

2. Двофазне (несиметричне) КЗ, що виникає при замиканні двох фаз (мал. 2).

Діюче значення періодичної складової двофазного КЗ

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}U}{Z_1 + Z_2}, \quad (2)$$

де Z_2 – опір зворотної послідовності короткозамкненого ланцюга СЕП. Відносна

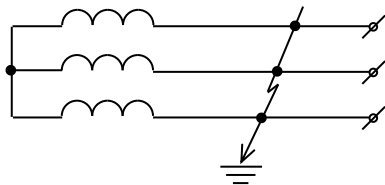
ймовірність даного виду КЗ 2-13 %.

3. Коротке замикання на землю в системі із глухозаземленою нейтраллю (мал. 3).

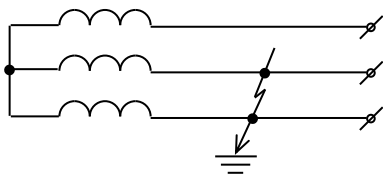
Діюче значення струму КЗ у системі із глухозаземленою нейтраллю

$$I^{(1)} = \frac{U}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \quad (3)$$

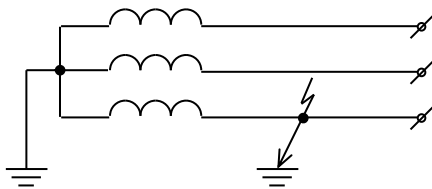
де Z_0 – опір нульової послідовності короткозамкненого ланцюга СЕП. Відносна ймовірність даного виду КЗ 60-92 %.



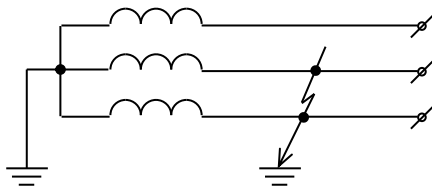
Мал.1. Схема трифазного симметричного КЗ



Мал.2. Схема двофазного (несиметричного) КЗ



Мал.3. Схема однофазного КЗ на землю



Мал. 4. Схема двофазного КЗ на землю

4. Двофазне КЗ на землю в системах із глухозаземленою нейтраллю (мал. 4). Відносна ймовірність даного виду КЗ 5-20 %.

Оскільки опори прямої й зворотної послідовності в СЕП приблизно однакові, то з достатньою для практики точністю можна вважати

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}U}{2Z_1}, \quad I^{(1)} = \frac{U}{2Z_1 + Z_0}. \quad (4)$$

Із зіставлення величин $I^{(3)}$, $I^{(2)}$, $I^{(1)}$ випливає, що при одній і тій же величині U найбільше значення періодичної складової струму КЗ можливо при трифазному симетричному КЗ. Тому величина ударного струму трифазного симетричного КЗ і його термічної дії використовується при виборі пристроїв.

Причинами к.з. може бути:

- пошкодження ізоляції електроустановок, викликане її механічними пошкодженнями, попаданням блискавки та іншими факторами;

- неправильні дії оперативного персоналу.

В режимі кз струми в пошкоджених фазах збільшуються в декілька разів, що викликає інтенсивне нагрівання струмопровідних частин. Також виникають значні електродинамічні зусилля, які можуть привести до механічного руйнування електричних апаратів.

У зв'язку з цим важливо вміти розраховувати величину струмів к.з. в мережі.

2. Процеси в електроустановках при виникненні к.з.

Основними джерелами живлення місця КЗ є турбо- і гідрогенератори електростанцій. У якості додаткових джерел, що генерують, розглядають синхронні компенсатори й електродвигуни напругою понад 1000 В, якщо вони безпосередньо пов'язані з місцем КЗ кабельними лініями,

токопроводами або через лінійні реактори. Підживлююча дія електродвигунів враховується тільки в початковий момент КЗ.

В залежності від характеру зміни напруги джерела живлення змінюється процес протікання КЗ. Розрізняють наступні три характерних випадки КЗ:

- при живленні від енергосистеми;
- при живленні від генератора без автоматичного регулювання струму порушення (АРВ);
- при живленні від генератора з АРВ.

Під терміном енергосистема або енергетична система розуміють потужне джерело живлення, напруга на шинах якого постійне при будь-яких змінах режиму мережі: стрибків навантаження, перевантаженню або КЗ.

Внутрішній опір енергосистеми набагато менше опору ланцюга КЗ у межах СЕП. Як правило, процеси при КЗ можуть розглядатися за умови, що джерелом електропостачання є енергосистема.

Розглянемо електричну мережу в режимі трифазного к.з. за незмінної напруги джерела живлення, рис. 5.

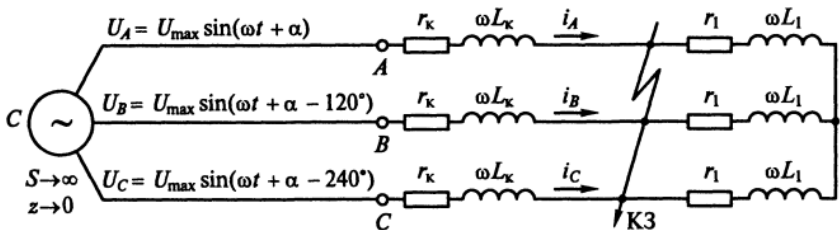


Рис. 5 - Схема електричної мережі з трифазним к.з.

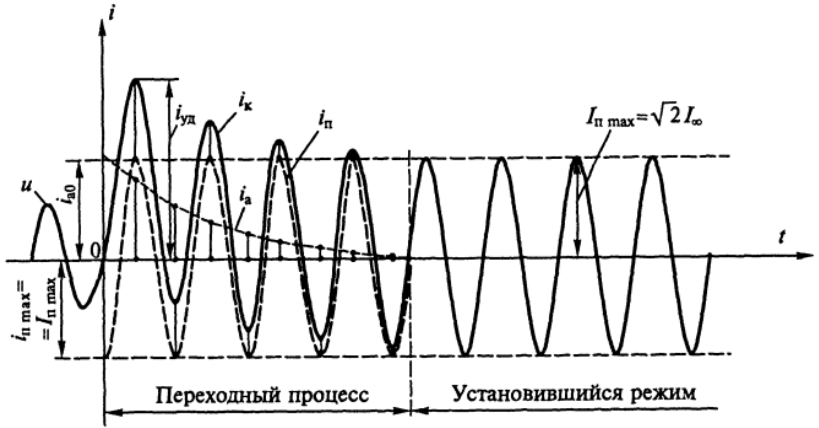


Рис. 6. Криві зміни струму трифазного к.з. за максимального значення аперіодичної складової:

- $i_{\text{к}}$ – повне значення струму к.з.;
- $i_{\text{а}}$ – аперіодична (вільна) складова струму к.з.;
- $i_{\text{п}}$ – періодична складова струму к.з.;
- $i_{\text{уд}}$ – ударний струм к.з.

Як видно, струм трифазного к.з. є сумою двох складових – періодичної $i_{\text{п}}$ та аперіодичної $i_{\text{а}}$. Для моменту часу $t=0$

$$i_{\text{а}0} + i_{\text{п}0} = i_{\text{н}0}, \quad (5)$$

де $i_{\text{н}0}$ – струм навантаження в момент виникнення к.з.

Вираз (5) можна записати

$$i_{\text{а}0} = i_{\text{н}0} - i_{\text{п}0}, \quad (6)$$

Зацікавлення представляють умови, за яких виникає максимально можливий повний струм кз. Такими умовами є проходження в момент кз через нуль напруги джерела живлення та відсутність струму навантаження до моменту кз (неробочий хід) $i_{n0} = 0$. Тоді

$$i_{a0 \max} = -I_{п \max}, \quad (7)$$

Аперіодична складова, яка виникає за рахунок запасу енергії в індуктивності, затухає за експоненціальним законом

$$i_{a t} = i_{a0} e^{-t/T_a}, \quad (8)$$

де T_a – постійна часу затухання

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}, \quad (9)$$

Чим більший активний опір кола, тим швидше відбувається затухання.

Періодична складова струму кз визначається за виразом

$$i_{п t} = \frac{U_{\max}}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{п \max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

Приблизно через півперіоду після початку кз миттєве значення повного струму кз досягає максимального значення, яке називають ударним струмом $i_{уд}$. Даний струм створює максимальні механічні зусилля в електричних апаратах. Величина ударного струму

$$i_{уд} = I_{п\ max} + i_{a\ t=0,01} = I_{п\ max} + I_{п\ max} e^{-0,01/T_a} = \\ = I_{п\ max} (1 + e^{-0,01/T_a})$$

$$i_{уд} = k_{уд} I_{п\ max},$$

де $k_{уд}$ – ударний коефіцієнт

$$k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a}. \quad (12)$$

Враховуючи, що $I_{п\ max} = \sqrt{2} I_{п0}$, отримаємо

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} k_{уд}. \quad (13)$$

Ударний коефіцієнт $1 < k_{уд} < 2$, наприклад для мереж 10-35 кВ приймають $k_{уд} = 1$.

3. Електродинамічна та термічна дія струмів к.з. на електричні апарати

Проходження струму кз в провідниках приводить до виникнення в них електродинамічних (механічних) зусиль. В нормальному режимі ці зусилля є незначними, але під час кз вони можуть досягати значень, які є небезпечними для електричних апаратів, шин, викликати їх деформацію та руйнування.

Сила взаємодії, яка виникає між провідниками, в яких протікають струми i_1 та i_2 , А, розраховується за виразом

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i_1 i_2 \frac{l}{a} k_{\Phi}, \text{ Н}, \quad (14)$$

де l – довжина провідників, м;
 a – відстань між осями провідників, м;
 k_{ϕ} – коефіцієнт форми, який враховує переріз провідників
(див. літ [1]).

Максимальні зусилля відповідають моменту проходження ударного струму. Для цього випадку силу, яка діє на фазний провід розраховують за виразом:

- для трифазного кз

$$F_{\max} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} i_{\text{уд}}^{(3)2} \frac{l}{a} k_{\phi} k_{\text{расп}}; \quad (15)$$

- для двофазного кз

$$F_{\max} = 2 \cdot 10^{-7} i_{\text{уд}}^{(2)2} \frac{l}{a} k_{\phi} k_{\text{расп}}, \quad (16)$$

де $k_{\text{расп}}$ – коефіцієнт розміщення, який враховує взаємне розміщення провідників (див. літ [1]).

Для запобігання механічних пошкоджень електричних апаратів під дією зусиль, які виникають під час проходження струмів кз, всі елементи струмоведучої конструкції повинні характеризуватись електродинамічною стійкістю, тобто повинні витримувати такі зусилля без руйнувань та критичних деформацій.

В залежності від виду електрообладнання умови його перевірки на електродинамічну стійкість можуть бути різними. Наприклад, заводи-виробники в паспорті електричних апаратів вказують гарантований струм електродинамічної стійкості $i_{\text{дин}}$ ($i_{\text{макс}}$). Умова електродинамічної стійкості матиме вигляд

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}; \quad (17)$$

Шинна конструкція характеризується електродинамічною стійкістю, якщо виконуються умови

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}} \quad (18)$$

Де σ_{\max} , $\sigma_{\text{доп}}$ - відповідно максимальне розрахункове та допустиме напруження в матеріалі шин.

Проходження струму кз в провідниках приводить до їх інтенсивного нагрівання. Це може привести до плавлення ізоляції, деформації струмоведучих частин. Тому провідники повинні перевірятись на термічну стійкість в режимі кз.

Умова термічної стійкості має вигляд

$$\vartheta_{\text{кон}} \leq \vartheta_{\text{доп}}, \quad (19)$$

де $\vartheta_{\text{кон}}$, $\vartheta_{\text{доп}}$ - відповідно кінцева температура нагрівання провідника в режимі кз та допустима температура його нагрівання.

Кількісну оцінку нагрівання провідників в режимі кз проводять на основі інтеграла Джоуля

$$B_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{к}t}^2 dt, \quad (20)$$

де $i_{\text{к}t}$ - повний струм кз в момент часу t , А;

$t_{\text{откл}}$ - тривалість кз, с.

Для випадку віддалених від джерела живлення кз розрахунок інтеграла Джоуля проводять за виразом

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п}0}^2 (t_{\text{откл}} + T_{\text{а.екв}}), \quad (21)$$

де $I_{\text{п}0}$ – діюче значення періодичної складової струму кз в початковий момент кз, кА;

$T_{\text{а экв}}$ – еквівалентна постійна часу затухання аперіодичної складової струму кз.

Розрахункова тривалість кз згідно ПУЕ складається з часу дії релейного захисту та часу вимикання вимикача в колі кз

$$t_{\text{откл}} = t_{\text{р.з}} + t_{\text{откл.в.}} \quad (22)$$

Заводи-виробники в паспорті електричних апаратів вказують гарантований середньоквадратичний струм термічної стійкості $I_{\text{тер}}$ та допустимий час його протікання $t_{\text{тер}}$. Умова термічної стійкості матиме вигляд

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}}. \quad (23)$$

4. Розрахункові умови для перевірки електричних апаратів за режимом к.з.

- вибір розрахункової схеми мережі для розрахунку струмів кз проводять для найгіршого з випадків – найбільшої величини струму кз в розрахунковій точці;

- в якості розрахункового виду кз для перевірки електродинамічної та термічної стійкості апаратів та провідників приймають як правило трифазне кз;

- в якості розрахункової точки приймають ту, при кз в якій провідники та апарати зазнають найбільшої електродинамічної та термічної дії.

Питання для самоперевірки

1. Електродинамічна та термічна дія струмів к.з.
2. Термічна дія струмів к.з.
3. Типи провідників, що застосовуються на електричних станціях та підстанціях.
4. Вибір жорстких шин.
5. Умови вибору струмообмежувальних реакторів.

ТЕМА 2. НАГРІВАННЯ СТРУМОВЕДУЧИХ ЧАСТИН

План

1. Втрати в електричних апаратах
2. Втрати в феромагнетиках, які не несуть струм
3. Способи передачі тепла в середині та з поверхні нагрітих тіл. Коефіцієнт тепловіддачі
4. Стаціонарний режим нагрівання
5. Номінальна сила струму для провідника в повітрі
6. Термічна дія струму короткого замикання. Термічна стійкість провідників
7. Тривалі і короткочасні допустимі температури

1. Втрати в електричних апаратах

Потужність та кількість теплоти, що виділяється при проходженні через провідник електричного струму визначається за законом Джоуля – Ленца:

$$P = i^2 \cdot R \rightarrow W = \int_0^t i^2(t) \cdot R \cdot dt. \quad (1)$$

Електричний опір провідника що ввімкнений в коло змінного і такого самого постійного струму, відрізняються між собою.

При постійному струмі опір легко знайти за відомою формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

де ρ – питомий опір;
 l – довжина провідника;
 S – площа поперечного перерізу.

При змінному струмі на активний опір провідника впливають поверхневий ефект і ефект близькості.

Тому вводиться коефіцієнт, що додатково враховує ці два ефекти – $K_{\delta\sigma}$ – коефіцієнт додаткових втрат.

Активним опором називають деякий фіктивний опір провідника, який будучи помноженим на квадрат діючого струму дає втрати потужності, що дійсно мають місце при даному змінному струмі.

Поверхневий ефект зумовлений тим, що змінний струм збуджує в провіднику неоднорідне по його перерізу магнітне поле, що викликає різну величину вихрового струму, направленого проти основного струму. Це призводить до того, що опір провідника збільшується, оскільки струм виштовхується до поверхні. З підвищенням температури провідність матеріалу зменшується, значить, поверхневий ефект спадає.

Ефект близькості полягає в тому, що магнітне поле одного провідника впливає на магнітне поле іншого провідника, розташованого поруч. Взаємовплив полів струмів цих провідників теж призводить до змін електричного опору провідника. Тому при змінному струмі:

$$R_{зм} = K_{\delta\sigma} \cdot R_{ном}, \quad (3)$$

$$K_{\delta\sigma} = K_n + K_{\sigma},$$

де $K_{\delta\sigma}$ – коефіцієнт додаткових втрат;

K_n – поверхневого ефекту (росте із ростом частоти і провідності);

K_{σ} – коефіцієнт близькості (росте в провідниках із ферромагнетика).

2. Втрати в феромагнетиках, які не несуть струм

В струмоведучих елементах феромагнетик приводить до значних величин $K_{\partial\delta}$ і великих енерговтрат. Так, наприклад, втрати зростають в 4 – 6 раз, якщо провідник робити із сталі.

В неструмонесучих феромагнітних деталях апаратів значну величину дістають втрати, викликані вихровими струмами, що індукуються при перетині змінним магнітним полем феромагнетика, із якого зроблені деталі апарату.

Струми, що при цьому виникають, сильно розігрівають феромагнетик. Втрати в неструмонесучому феромагнетичу зумовлені як вихровими струмами, так і втратами, що зв'язані з процесами перемагнічування.

Площа петлі відповідає втратам на гістерезис (рис. 1.).

Повні втрати магнітопроводу із сталі визначаються за формулою:

$$P_{ct} = P_e + P_r = [\sigma_e \left(\frac{f}{100}\right)^2 + \sigma_r \left(\frac{f}{100}\right)^2] B^2 \cdot 10^{-8},$$

де P_e – втрати на вихрові струми;

P_r – втрати потужності на гістерезис;

f – частота, Гц;

B – магнітна індукція, Тл;

σ_e , σ_r – коефіцієнти втрат, що залежать від конструкції;

Для зменшення втрат в магніто проводах їх роблять у вигляді тонких листів, ізольованих між собою.

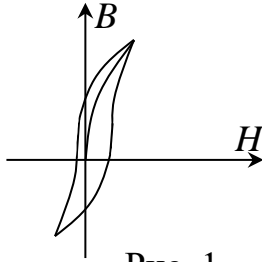


Рис. 1

3. Способи передачі тепла в середині та з поверхні нагрітих тіл. Коефіцієнт тепловіддачі

В загальному, тепла енергія витрачається на збільшення температури електричного апарату та частково передається оточуючому середовищу.

Розрізняють три види передачі теплоти:

- 1) теплопровідність;
- 2) конвекція;
- 3) теплове випромінювання, м²/с.

Явище теплопровідності описується за формулою:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \Delta t \cdot \Delta S, \quad (4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

ΔQ – кількість теплоти, що проходить за час Δt крізь площадку ΔS в напрямку x .

Важливою характеристикою процесу теплопровідності є температуропровідність, що характеризує здатність речовини вирівнювати температуру (позначається буквою a , має розмірність м²/с):

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c},$$

де ρ – густина;

C – питома теплоємність;

a – температуропровідність.

Конвекція – це спосіб передачі теплоти при контакті нагрітого твердого тіла з газом або рідиною. При цьому молекулярний шар газу або рідини отримує енергію від твердого тіла шляхом теплопровідності, а далі перенос теплоти здійснюється більш нагрітими шарами газу або рідини (їх рухом і переміщенням внаслідок їх меншої густини, ніж у холодних). Розрізняють *вільну* або *природну* конвекцію та *вимушену* (штучну). При штучній конвекції охолоджуюче середовище рухається за допомогою насосів або вентиляторів. Кількість теплоти, що віддається тілом за рахунок конвекції описується законом Ньютона-Ріхмана:

$$Q = \alpha(\theta_2 - \theta_1), \quad (5)$$

де θ_2 – температура поверхні тіла від якого передається теплота;

θ_1 – температура тіла, до якого передається теплота;

α – коефіцієнт тепловіддачі.

Коефіцієнт α – залежить від температури, в'язкості, густини охолоджуючого середовища, температури поверхні, а також від форми поверхні тіла, що охолоджується, і його розташування відносно середовища і поля сил тяжіння. В більшості випадків він визначається емпіричним шляхом. Деякі з емпіричних формул для визначення коефіцієнта α приведені нижче.

Для горизонтальних круглих провідників діаметром 10 – 80 мм:

$$\alpha = 3.5 \left(\frac{10}{d} \right)^{\frac{1}{4}} (\theta_2 - \theta_1)^{0.25}.$$

Для вертикальних площин в трансформаторному маслі:

$$\alpha = 43(\theta_2 - \theta_1)^{0.25}.$$

Для горизонтального циліндра в трансформаторному маслі:

$$\alpha = 160(\theta_2 - \theta_1)^{0.3}.$$

Теплопередача сильно нагрітих тіл здійснюється шляхом випромінювання енергії. За законом Стефана Больцмана для абсолютно чорного тіла кількість теплоти, що віддається тілом:

$$\Delta Q = \sigma \cdot T^4 \cdot S \quad (6)$$

де σ – стала Стефана Больцмана,

$$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{B}{m^2 \cdot K^4}.$$

Сумарна кількість теплоти, яка передається всіма видами теплообміну найбільше залежить від температури. Для розрахунків теплоти, що віддається в оточуюче середовище всіма видами теплопередачі застосовують формулу:

$$q = K_m \cdot s \cdot \Delta \theta, \quad (7)$$

де K_m – коефіцієнт теплообміну (теплопередачі), що враховує всі види теплопередачі.

4. Стаціонарний режим нагрівання

Стаціонарність режиму означає, що температура частин апарату вже не зміниться в часі. Практично стаціонарним вважається режим, при якому температура збільшується не

більше ніж на 1°C за 1 годину нагрівання. При цьому вся теплота, що виділяється, віддається зовнішньому середовищу.

Застосуємо баланс енергії для опису цього процесу.

На основі закону Джоуля – Ленца:

$$1) i^2 \cdot R = c \cdot \gamma \cdot dT + q, \quad (8)$$

Це – загальна формула балансу енергії (теплота, що виділяється в наслідок проходження струму I по провіднику з опором R іде на нагрівання провідника та передається оточуючому середовищу).

γ – питома густина;

V – об'єм провідника; $m = \gamma \cdot V$.

q – тепловий потік.

Коли режим стаціонарний, зміна температури дорівнює нулю. Тоді:

$$2) i^2 \cdot R = K_m (\theta_1 - \theta_0);$$

$$3) i^2 \cdot \rho \frac{l}{S} = K_m (\theta_1 - \theta_0). \quad (9)$$

$$4) \text{Якщо струм постійний: } I^2 = \frac{K_m (\theta_1 - \theta_0) S}{\rho \cdot l}.$$

$$5) I = \sqrt{\frac{K_m (\theta_1 - \theta_0) S}{\rho \cdot l}}. \quad (10)$$

Питомий опір: $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t^{\circ})$

$$\text{Тому: } I = \sqrt{\frac{K_m (\theta_1 - \theta_0) S}{\rho_0 (1 + \alpha \cdot T_k)}}. \quad (11)$$

Коли протікає змінний струм, то величина опору залежить від частоти струму і розташування між собою провідників (поверхневий ефект та ефект близькості), тому замість ρ_0 треба ставити $\rho_{екв}$:

$$\rho_{екв} = \rho \cdot K_n \cdot K_{бл} = \rho \cdot K_{доб},$$

де K_n – коефіцієнт поверхневого ефекту;

$K_{бл}$ – коефіцієнт близькості;

$K_{доб}$ – добавочний коефіцієнт.

Якщо врахувати, що потік проходить через деяку бічну поверхню провідника $S_{б}$, то формули запишуться так:

$$i^2 \cdot R \cdot dt = c \cdot \gamma \cdot V \cdot dT + q \cdot S_{б} \cdot dt.$$

Поскільки $q \cdot S_{б} = K(\theta_1 - \theta_2)$ і $dT = 0$, то

$$i^2 \cdot R = K_m(\theta_1 - \theta_0)S_{б},$$

$$i^2 \cdot \rho \frac{l}{S_n} = K_m(\theta_1 - \theta_0)S_{б},$$

$$I^2 = \frac{K_m(\theta_1 - \theta_0)S_{б} \cdot S_n}{\rho \cdot l},$$

$$I = \sqrt{\frac{K_m(\theta_1 - \theta_0)S_{б} \cdot S_n}{\rho_0 \cdot l(1 + \alpha\theta_1)}}, \quad (12)$$

де θ_1 – кінцева температура, дорівнює температурі при номінальному режимі.

5. Номінальна сила струму для провідника в повітрі

При струмі, що дорівнює номінальному із (12) можна визначити різницю температур $(\theta_1 - \theta_0)$ для випадку нагрівання провідника при умові, що температура провідника лишається сталою, відповідає сталій потужності джерела. Із (12) отримуємо:

$$(\theta_1 - \theta_0) = \frac{I^2 \cdot l \cdot \rho_0 (1 + \alpha\theta)}{K_m \cdot S_{\bar{\sigma}} \cdot S_n}.$$

$$S_{\bar{\sigma}} = p \cdot l,$$

де p – периметр поперечного перерізу провідника.

При постійному струмі питомий опір ρ_0 – таблична величина, звідси:

$$(\theta_1 - \theta_0) = \frac{I^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha\theta)}{p \cdot K_m \cdot S_n} \quad (13)$$

При змінному струмі треба враховувати, що $\rho = K_{\text{доб}} \cdot \rho_0$, тому:

$$(\theta_1 - \theta_0) = \frac{I^2 \cdot K_{\text{доб}} \cdot \rho_0 (1 + \alpha T_k)}{p \cdot K_m \cdot S_n} \quad (14)$$

K_m – для міді – $(6 - 9) \cdot 10^{-4}$ Вт/см², а для сталі – $(10 - 14) \cdot 10^{-4}$ Вт/см².

Номинальна сила струму, на відміну від режиму короткого замикання, не викликає сильного розігріву провідників, і може бути знайдена із формули (14), оскільки, втрати на теплопередачу „провідник – оточуюче повітря” в номінальному режимі цілком достатні, щоб при даному температурному коефіцієнті опору провідника практично не змінювати потужність, яка споживається елементом або апаратом.

6. Термічна дія струму короткого замикання. Термічна стійкість провідників

При режимі короткого замикання доля енергії, що відводиться від провідника, є невеликою у порівнянні з тією, що виділяється у провіднику. Відбувається адіабатний процес. Вся кількість теплоти іде на збільшення температури провідника.

Запишемо баланс енергії для цього випадку:

$$1) I^2 \cdot R \cdot dt = c \cdot \gamma \cdot V \cdot dT + q \cdot dt,$$

$$2) R = R_0(1 + \alpha T),$$

$$3) \int_0^1 I^2 \cdot R_0(1 + \alpha T) dt = \int_{T_n}^{T_k} c \cdot \gamma \cdot V \cdot dT,$$

де T_n – початкова температура;

T_k – кінцева температура.

$$I^2 \left(\frac{R_0}{\gamma \cdot c \cdot V} \right) t = \int_{T_n}^{T_k} \frac{dT}{1 + \alpha T} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(1 + \alpha T_k)}{(1 + \alpha T_n)},$$

$$I^2 \cdot t = \frac{\gamma \cdot c \cdot V}{l \cdot \rho_0 \cdot \alpha} \ln \frac{(1 + \alpha T_k)}{(1 + \alpha T_n)}. \quad (15)$$

Критерієм термічної стійкості електричних апаратів при проходженні струму короткого замикання є величина $I^2 \cdot t$. Як видно із формули (15), вона залежить від фізичних властивостей матеріалу, геометрії та допустимої температури нагрівання.

Термічна дія струму короткого замикання проявляється в нагріванні провідників до високих температур. Це є небезпечним також і для ізоляції, на якій кріпляться провідники. (Наприклад, внаслідок великих температурних перепадів між поверхнею ізоляції, що знаходиться в контакті з провідником і протилежною стороною ізолятора. Ізолятор, як правило – хороший тепло ізолятор. Тому перепад досягає значної величини).

Якщо струм короткого замикання змінний, то треба врахувати вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості на величину ρ . Крім того, треба пам'ятати, що під струмом, який стоїть в даній формулі, розуміють діюче значення струму короткого замикання. При постійному I_{K3} треба підставляти в дану формулу стаціонарне значення струму КЗ.

7. Тривалі і короткочасні допустимі температури

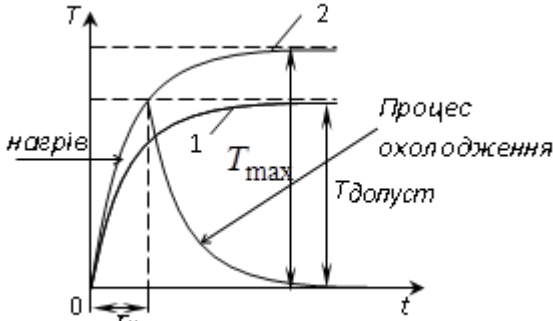
Із формули (15) видно, що при сталому струмі кінцева температура є функцією часу. При цьому:

$$T_k - T_n = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) T_{cm}, \quad (16)$$

де $T_k - T_n$ – надлишок температури внаслідок короткого замикання;

T_{cm} – стаціонарна температура;

τ – стала часу, що залежить від властивостей матеріалу і має розмірність часу. Вона також залежить від маси провідника, його геометричних розмірів та теплоємності і коефіцієнта теплообміну.



На протязі часу, рівному $3 - 5 \tau$ система виходить на стаціонарний режим.

Фізичний зміст τ :

τ – це той час, протягом якого провідник нагрівається до стаціонарної температури $T_{ст}$ при повній відсутності тепловіддачі.

На рис. 2 показано процеси нагрівання і охолодження провідників в різних режимах, при різних струмових навантаженнях.

При тривалому режимі допустимі навантаження вибираються такі, щоб надлишок температури, що встановився, дорівнював допустимому $T_{доп}$.

При тому ж навантаженні в короткочасному режимі за час t_H надлишок температури складав би T_1 , тобто провідник не був би повністю використаний по нагріву. Тому при короткочасному режимі провідник треба навантажити так, щоб в кінці цього

режиму (за час t_H) зміна надлишку температури йшла по кривій 2.

При цьому за час нагрівання в короткочасному режимі $T = T_{дон}$.

Якби ми продовжували процес при тому самому струмі, то в стаціонарному режимі T досягла б величини $T_{max} > T_{дон}$. Коефіцієнт перевантаження по потужності втрат K_p визначається відношенням температур:

$$K_p = \frac{T_{max}}{T_{дон}}$$

Коефіцієнт перевантаження по струму:

$$K_i = \sqrt{K_p} \quad (\text{оскільки } i \sim \sqrt{P}).$$

Процес охолодження відбувається по тій самій кривій і в короткочасному, і в тривалому режимі.

Питання для самоперевірки

1. Термічна дія струму короткого замикання.
2. Тривалі допустимі температури.
3. Короткочасні допустимі температури.

ТЕМА 3. МЕТОДИ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ

План

1. Загальні відомості
2. Схеми вмикання реакторів

1. Загальні відомості

Великий рівень струмів к.з. призводить до подорожчання РП та розподільної мережі, так як потребує установки потужних, дорогих вимикачів та прокладки термічно стійких кабелів великих перерізів, підвищує вимоги до динамічної стійкості шин та апаратів.

На даний момент часу розроблений комплекс заходів, які дають можливість регулювати рівні струмів к.з., обмежувати їх при розвитку електроустановок.

Найбільш поширеними методами обмеження струмів к.з. є:

- 1) секціонування електричних мереж;
- 2) установка струмообмежуючих реакторів (індивідуальних, групових, групових-здвоєних);
- 3) широке застосування трансформаторів з розщепленими обмотками низької напруги;
- 4) застосування трансформаторів з підвищеним значенням напруги к.з.;
- 5) роздільна робота генераторів, трансформаторів.

Вибір методу обмежень струмів к.з. визначається місцевими умовами установки та повинен бути підкріплений техніко-економічним розрахунком.

Взагалі обмеження струмів к.з. досягається збільшенням опору кола к.з.. Обмеження струмів к.з. підвищує надійність роботи пристроїв, зменшує ймовірність пошкодження електрообладнання при к.з., дає можливість використовувати більш просте і дешеве електрообладнання (апарати, струмоведучі частини).

Роздільна робота трансформаторів (рис.1).

Роздільна робота дає можливість суттєво знизити рівні струмів к.з. на станціях. Але при роздільній роботі схема стає менш маневреною. На секціях можуть бути різні рівні напруги. Це не бажано з точки зору електропостачання споживачів. Обладнання може завантажуватися не найкращим чином, у зв'язку з чим зростають втрати потужності по мережі. Тому роздільну роботу застосовують тільки на потужних станціях з агрегатами 100 МВт та вище.

На вторинній стороні п/ст. обмеження струмів к.з. здійснюється при роздільній роботі трансформаторів за рахунок зменшення розрахункового опору кола к.з.

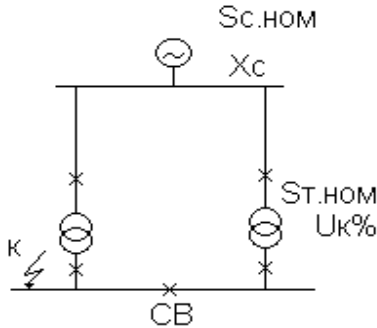


Рис. 1 - Роздільна робота трансформаторів

- 1) $X_{роз} = X_c + (U_k\% / 2 \cdot 100) \cdot (S_{c.ном} / S_{т.ном})$
- 2) $X_{роз} = X_c + (U_k\% / 100) \cdot (S_{c.ном} / S_{т.ном})$

Струм к.з. в точці К при роздільній роботі трансформаторів буде в 2 рази менший. Але цей спосіб не завжди доцільний. Наприклад, на потужних підстанціях на вторинній напрузі яких встановлені синхронні компенсатори, ускладнена роздільна робота трансформаторів із-за умови видачі в мережу реактивної потужності, яка виробляється компенсаторами.

Застосування трансформаторів з розщепленими обмотками (рис.2).

Трансформатор з розщепленими обмотками – це багатообмоточний трансформатор, в якому дві чи більше обмоток розраховані на одну напругу та використовуються для

приєднання до різних секцій збірних шин підстанції. Обидва кола розщепленої обмотки розраховуються на однакову потужність (на 50 % номінальної потужності трансформатора) і мають однакові опори.

При потужності понижуючого трансформатора 25 МВ·А та вище застосовують розщеплення обмотки низької напруги. Це дає можливість збільшити опір трансформатора в режимі к.з. приблизно в два рази, порівнюючи з трансформатором без розщепленої обмотки. На рис.19 секційний вимикач (СВ) нормально вимкнута і генератори Г1 і Г2 працюють паралельно через трансформатор з розщепленими обмотками. При відключенні одного з генераторів секційний вимикач повинен бути увімкнутим, щоб секція шин першого генератора живилась від другого генератора. Це дає можливість уникнути перетоку потужності через розщеплені кола обмоток низької напруги трансформатора, що спонукає до значних втрат напруги та енергії.

Застосування реакторів.

Струмообмежуючі реактори призначені для обмежень рівня струму к.з. та для підтримки на непошкоджених частинах електроустановки достатньо високого рівня залишкової напруги (бажано, щоб $U_{зл} \geq 0,6U_n$). При цьому зберігається стійкість роботи генераторів та двигунів споживачів.

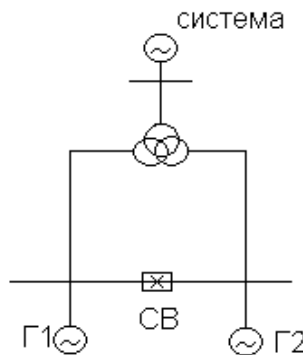


Рис. 2 - Застосування трансформаторів з розщепленими обмотками

2. Схеми вмикання реакторів

За умовами роботи секційні й лінійні реактори мають суттєву різницю. В нормальному режимі перетік потужності через СР (секційний реактор) незначний, при симетричній схемі він приблизно дорівнює нулю. Тому величина реактивності секційного реактора для збільшення його струмообмежуючої дії може бути великою (рис.3).

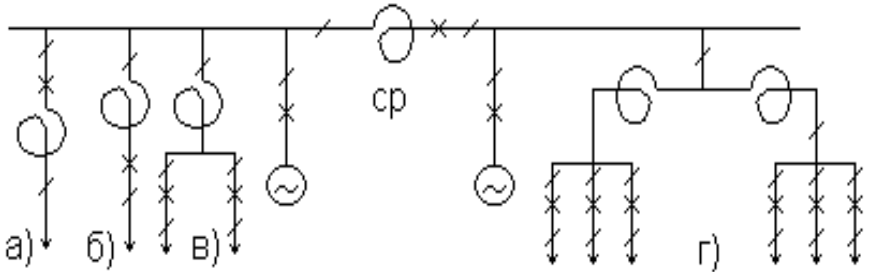


Рис. 3 - Схеми включення реакторів

Номінальний струм секційного реактора вибирається за режимом відключення одного генератора або трансформатора зв'язку з системою, коли через реактор протікає збиткова (або недостатня) потужність секції

$$I_{p.ном}=(0,6\div 0,8) I_{Г.ном}.$$

Лінійний реактор.

Через лінійний реактор постійно протікає струм навантаження. Тому в ньому постійно мають місце втрати потужності та напруги. При чому втрати напруги зростають зі збільшенням реактивності реактора, так як

$$\Delta V_p=I_p \cdot X_p \cdot \sin \varphi.$$

Тому реактивність лінійного реактора не може бути взята значно великою. Частіше всього враховується те, що втрати напруги на лінійному реакторі в робочому режимі не повинні бути більше 5 %.

Лінійний реактор вибирають або за умовою обмеження струму к.з. до величини вимикаючої здатності лінійних вимикачів, або за умовою термічної стійкості кабелів розподільної мережі.

За умовою компоновки обладнання в ЗРП в основному застосовується схема (рис. 3, а ;б). Коли номінальні струми окремих ліній незначні, застосовується схема з груповими реакторами (рис. 3, в; г). Дані схеми дають можливість зменшити кількість приєднань до збірних шин та спростити РП.

Зі збільшенням I_n реактора його струмообмежуюча дія при тій же реактивності у відносних одиницях зменшується

$$X_p = X_p \cdot (U_n / \sqrt{3} \cdot I_n).$$

Тому крупні реактори, маючи великий номінальний струм, мають і більшу реактивність, порівнюючи з лінійними індивідуальними реакторами. З тієї ж причини струмообмежуюча дія лінійних індивідуальних реакторів, як правило, в 2-3 рази більша, чим у секційних реакторів.

Здвоєні реактори

Конструктивно вони подібні звичайним реакторам, але від середньої точки обмотки є допоміжний вивід (рис. 4).

Перевага здвоєних реакторів полягає в тому, що залежно від схеми включення та напрямку струмів в обмотках індуктивний опір його може збільшуватися або зменшуватися. Цю властивість здвоєного реактора використовують для зменшення падіння напруги в нормальному режимі та обмеженні струму к.з.

При к.з. за реактором точки К струм значно перевищує струм в непошкодженій частині. Відносний вплив взаємної індуктивності зменшується. Втрати напруги в реакторі та ефект струмообмеження визначається в основному лише індуктивним опором $X_b = \omega L$. Таким чином опір реактора в режимі к.з. зростає, порівнюючи з нормальним режимом. При к.з. в точці К2, тобто на генераторі Г2, струм від генератора Г1 протікає в одному напрямку. Взаємна індукція діє згідно з власною індукцією обмоток. Наскрізний опір реактора буде дорівнювати:

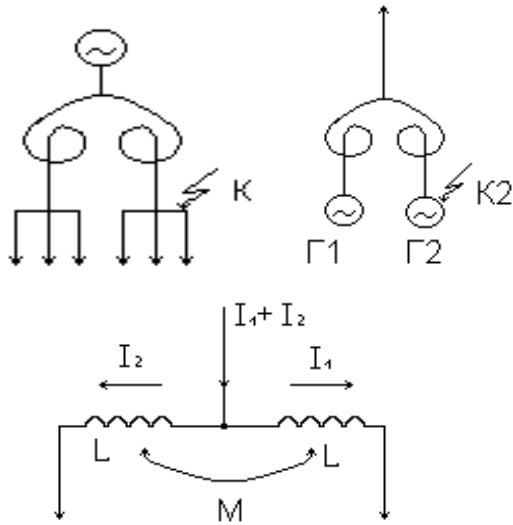


Рис. 4 - Здвоєні реактори

$$X_{\text{скр}} = 2\omega L + \omega M.$$

Значна втрата напруги в нормальному режимі роботи кола не дає можливість встановлювати індивідуальні та групові реактори великого опору. Тому для випадків, коли потрібні значні обмеження струмів к.з., розробляють БСП (безінерційні струмообмежуючі пристрої).

Питання для самоперевірки

1. Будова та призначення струмообмежуючих реакторів.
2. Схеми вмикання струмообмежуючих реакторів.
3. Умови вибору струмообмежуючих реакторів.
4. Координація струмів КЗ в енергосистемі.
5. Будова подвійного струмообмежувального реактора.

ТЕМА 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ

План

1. Загальні відомості
2. Режими роботи контактів
3. Матеріали контактів
4. Конструкція контактів

1. Загальні відомості

Електричним контактом називається з'єднання двох провідників, що дозволяє проводити струм. Провідники, що співторкаються, називаються контакт-деталлями або просто контактами. Як би не була сумлінно оброблена поверхня торкання контактів, електричний струм проходить з одного контакту на інший тільки в окремих точках, в яких ці поверхні торкаються, оскільки абсолютно гладкої поверхні не можна отримати ні при якому методі обробки. Приблизна картина цього явища подана на рис.1. Завдяки нажиму одного контакту на інший формується і утворюються площадки дійсного торкання контактів. Розглянемо процес переходу струму з одного контакту на інший при торканні двох циліндричних контактів по торцях. Припустимо, що контакти мають тільки одну площадку торкання і що ця площадка має форму круга радіусом a (рис.2а). Величину радіуса a при пластичній деформації можна знайти за допомогою формули

$$\pi a^2 = F/\sigma \quad (1)$$

де F – сила нажиму контактів; σ – часовий опір стисканню матеріалу контактів.

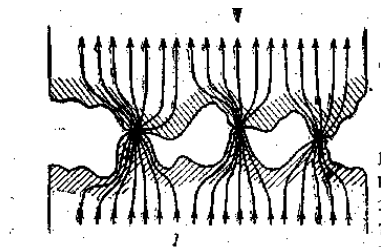


Рис. 1 – Приблизна картина проходження електричного струму в контактї

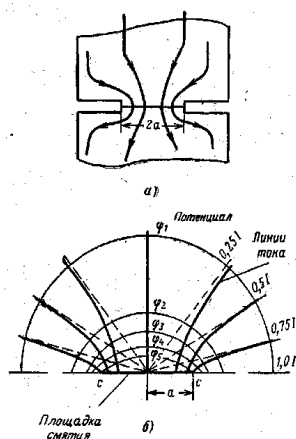


Рис.2 – Ідеалізована картина розтікання струму в одноточковому контактї (а) і картина поля струму і електричних потенціалів для двох напівбескінечних тіл, що контактують в одній точці торкання (б).

У результаті стягування ліній струму до площадки торкання шлях струму змінюється. Переріз провідника, через який фактично проходить струм, стає меншим, що викликає збільшення опору.

Опір в області точки торкання, зумовлений явищем стягування струму, називається перехідним опором контакту. Картина розтікання струму в області стягування (рис.2а) аналогічна картині розтікання струму з плаского диску радіусом a в напівбезкрайне середовище. Враховуючи, що розміри області стягування малі порівняно з розмірами тіла контакту, реальні контакти можна замінити напівбезконечними тілами. Для двох напівбезконечних тіл, що контактують по одній круглій площадці торкання картина поля струму і електричних потенціалів ϕ подана на рис.2б, де еквіпотенціальні поверхні є напівеліпсоїдами повертання, лінії струму – гіперболами ыз загальним фокусом. Для такої ідеалізованої картини розтікання струму в контактах опір визначається виразом

$$R_{\Pi} = \rho/2a . \quad (2)$$

З точністю до 5% ця формула справедлива, якщо поперечні розміри тіла контакту перевищують в 13 раз діаметр площадки торкання. У більшості практичних випадків ця умова дотримується, бо розміри площадки торкання звичайно не перевищують долей міліметра.

Знаходячи з (1) радіус площадки a і підставляючи його значення в (2), отримуємо:

$$R_{\Pi} = \frac{\rho\sqrt{\pi\sigma}}{2\sqrt{F}} = \frac{k}{F^{\frac{1}{2}}} . \quad (3)$$

Таким чином, опір, зумовлений стягуванням , пропорційний питомому опору, кореню квадратному з часового опору на зминання матеріалу σ і зворотно пропорційний кореню квадратному з сили натяжіння на контакти F .

Якщо має місце пружна деформація контактуючих виступів, то формула для опору R_{Π} має той же вигляд, але показник ступеня у сили рівний 1/3. У літературі є значення коефіцієнтів k для одноточкових свіжезачищених контактів. На основі математичної обробки експериментальних матеріалів Лисов запропонував

формули для R_{Π} контактів, що використовуються в апаратах високої напруги.

Одноточковий контакт використовують в основному тільки при малих струмах. При великих струмах застосовується багатоточковий контакт. Оскільки струм проходить через декілька контактних переходів, ввімкнених паралельно, перехідний опір зменшується порівняно з одноточковим контактом при незмінному натиску. Однак натиск у дійсності в кожній контактній точці зменшується. Кількість контактуючих точок збільшується з ростом сили натиску за досить складним законом. Для такого натиску перехідний опір виражається рівнянням

$$R_{\Pi} = \frac{k}{F^m} . \quad (4)$$

Показник m змінюється від 0,7 до 1. Опір R_{Π} залежить від обробки поверхні. Шліфування приводить до того, що на поверхні залишаються більш пологі виступи з великим перерізом. Змінання таких виступів можливе тільки при великих силах натиску. Тому опір шліфованих контактів вище, ніж контактів з більш грубою обробкою. До цього ми розглядали тільки перехідний опір, зумовлений явищем стягування ліній струму. В дійсності контактуючі поверхні покриті адсорбованими молекулами газів, в яких розташовані контакти до їх замикання. Часто ці молекули вступають в хімічну реакцію з матеріалом контактів, у результаті чого на поверхні металу можуть виникати плівки з дуже великим опором. Якщо напруга кола, що замикається, дуже мала або натиск на контакти недостатній, то контакти інколи взагалі не пропускають струму. Як тільки свіжозачищена поверхня контактів співторкається з повітрям, в ту ж мить починається процес утворення плівки і перехідний опір може зростати в десятки разів.

У зв'язку з цим контакти на малі струми (малі натиски) виготовляють з благородних металів, що не піддаються окислюванню (золото, срібло, платина та ін.).

У сильнострумкових контактах плівка окислів руйнується або завдяки великим натискам, або шляхом самозачищення при вмиканні за рахунок прослизання одного контакту відносно іншого. При проходженні струму через область стягування ліній струму контакт нагрівається. Перевищення температури в області стягування $\Delta\tau$ приблизно можна знайти за допомогою формули

$$\Delta\tau = U_k^2 / 8 \lambda \rho ,$$

де U_k – падіння напруги на перехідному опорі, що становить $I R_{\Pi}$; λ – питома теплопровідність; ρ – питомий електричний опір матеріалу контакту.

Найбільшу температуру має площадка торкання. З віддаленням від неї температура швидко падає. Протяжність області стягування невелика і становить (5-6)а. Тепло, що виділяється в області стягування ($I^2 R_{\Pi} / 2$), розподіляється по тілу контакту і віддається в оточуюче середовище через бічну поверхню тіла контакту. При цьому виникає додатковий перепад температури $\Delta\tau$, який можна визначити за формулою

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} I^2 R_{\Pi} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T \rho s}} , \quad (5)$$

де k_T – питомий коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тіла; ρ і s – периметр і переріз тіла контакту. При проходженні струму тіло контакту нагрівається, і перевищення температури поверхні над оточуючим середовищем τ_T визначається формулою Ньютона. Температура площадки торкання складає

$$\theta_k = \theta_0 + \tau_T + \Delta\tau + \Delta\tau_k = \theta_0 + \frac{I^2 \rho}{k_T \rho s} + \frac{1}{2} I^2 R_{\Pi} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T \rho s}} + \frac{(I R_{\Pi})^2}{8 \lambda \rho} \quad (6)$$

Із ростанням температури опір стягування змінюється внаслідок збільшення питомого опору матеріалу. Теоретично Хольм отримав

$$R(\theta) = R(0) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \Delta \tau_k \right) \quad (7)$$

де $R(0)$ – опір стягування при температурі, що дорівнює температурі тіла контакту $\theta + \tau_T$.

При підвищенні струму через контакт збільшується падіння напруги

$$U_k = IR_{\Pi}$$

Згідно з рівнянням (5) зростає перевищення температури контактної точки $\Delta \tau_k$. Це, в свою чергу, викликає збільшення опору R_{Π} від напруги згідно з (7). Залежність опору R_{Π} від напруги U_k називається R-U характеристикою контакту (рис.3). При виведенні рівняння (7) міцність матеріалу не враховувалася, тому воно дає гарний результат при температурах, що не перевищують температуру розм'якшення матеріалу. При температурах розм'якшення площадка торкання збільшується, а перехідний опір різко зменшується при незмінному натиску. Це має місце при $U_k = U_p$, де U_p – напруга рекристалізації при розм'якшенні матеріалу. Якщо температура продовжує зростати, то можна досягнути плавлення точки торкання, чому відповідає напруга плавлення $U_k = U_{пл}$. У правильно розрахованому контакті температура не повинна досягати температури розм'якшення матеріалу.

2. Режими роботи контактів

При вмиканні контактів можуть мати місце наступні процеси: 1) вібрація контактів; 2) ерозія в результаті утворення розряду між контактами, що сходяться. При вмиканні на існуюче КЗ вібрація контактів посилюється через виникнення відкидаючих сил у точці торкання. Для того, щоб не було оплавлення контактів в момент їх торкання, необхідно силою попереднього натягу контактної

пружини компенсувати електродинамічні сили відкидання і створити такий натиск, при якому падіння напруги на перехідному опорі не призводить до оплавлення точки торкання.

В апаратах на великі струми КЗ електродинамічні сили в торцевих контактах бувають настільки великими, що контактні пружини повинні розвивати зусилля в декілька тисяч ньютонів. Очевидно, що в подібних випадках треба переходити до іншої конструкції контактів, що дає меншу електродинамічну силу відкидання. При вмиканні кола в міру наближенні рухомого контакту до нерухомого зростає напруженість електричного поля між контактами. У дугову форму розряд не переходить, бо рухомий контакт продовжує рухатися, і, замикаючи проміжок, припиняє розрядні процеси. Але виникаючі при пробі електрони бомбардують анод і викликають його знос. Метал аноду відкладається на катоді у вигляді тонких голок.

Знос контактів у результаті переносу матеріалу з одного контакту на інший, тобто випаровування в оточуюче середовище без зміни складу матеріалу, називається фізичним зносом або ерозією. Ерозія при замиканнях невелика, але при малих натисках і малих відстанях між контактами вона може призвести до їх спікання.

В апаратах високої напруги при наближенні контактів пробой відбувається на великих відстанях. Виникаюча дуга горить досить довго, при цьому можливе зварювання контактів, особливо при вмиканні на існуюче КЗ. За рахунок використання великого числа послідовно з'єднаних розривів зменшується напруга, що приходиться на розрив. Це дає можливість знизити час попереднього пробію до 0,005с, що визнано безпечним для олійних вимикачів.

Проведення струму у ввімкненому стані

У цьому режимі слід розрізнити два випадки: через контакти проходить тривалий номінальний струм і через контакти проходить струм КЗ. Для надійної роботи контактів необхідно,

щоб при номінальному струмі I_n падіння напруги на опорі R_n було менше $U_{к1}$:

$$I_n R_n \leq U_{к.доп.} = 0,5 \div 0,8 U_{к1}$$

Таблиця 1. – Мінімальні значення напруги і струму, необхідні для підтримки дугового розряду

Матеріал контактів	$U_0, В$	$I_0, А$
платина	17,0	0,9
золото	15,0	0,38
срібло	12,0	0,4
вольфрам	17,0	0,9
мідь	12,3	0,43
вугілля	18-22	0,03

При короткому замиканні крізь контакти проходять струми, що в 10-20 разів перевищують номінальні значення. Внаслідок малої постійної часу нагрівання температура контактної площадки практично миттєво піднімається і може досягати температури плавлення.

Аналітичний розрахунок плавлячого струму при короткому замиканні ускладнений, бо існуючі формули не враховують розм'якшення матеріалу при високій температурі. Тому при практичних розрахунках контактів рекомендується користуватися дослідними даними, що безпосередньо зв'язують зварюючий струм і силу натиску.

При розрахунках динамічної стійкості контактів широко користуються формулою, отриманою Г.В. Буткевичем:

$$I \leq k\sqrt{F},$$

де I – струм динамічної стійкості (звичайно беруться амплітуда ударного струму), А;

F – сила натиску, кГ.

Значення коефіцієнта k наведені в літературі.

Зварювання контактів залежить від конструкції самих контактів і струмоведучого кола апарата. Електродинамічні сили, що виникають у струмоведучих частинах, необхідно використовувати для підвищення стійкості контактів.

У болтовому шинному з'єднанні при короткому замиканні струмоведучий провідник нагрівається до температури 200-300°C.

Стягуючі сталеві болти нагріваються в основному за рахунок теплопроводності, бо струм крізь болти практично не проходить. Температура болтів не перевищує 20% температури шин. Тепловий коефіцієнт розширення в міді і алюмінія значно вище, ніж у сталі, тому шини, збільшуючись за товщиною більше, ніж подовжуються, будуть їх розтягувати. При цьому деформація болтів може перейти за межі пружності. Тоді після відключення кола і охолодження контакта внаслідок витягування болтів натиск у контактах зменшиться, що приведе до збільшення його опору, сильного нагрівання і наступного руйнування.

Для того щоб уникнути пластичної деформації шин, ставлять відповідні шайби. Внаслідок малої міцності алюмінієвих шин може виникнути пластична деформація, що призводить до псування контакту. Тому для стабільності алюмінієвого контакту необхідно виконувати попередній обтиск, ущільнення шин, або ставити під гайки пружинні шайби чи спеціальні пружини, які обмежуватимуть деформації елементів контактів.

Відключення кола

При розмиканні контактів сила натиску зменшується, перехідний опір зростає, тому зростає температура точок торкання. У момент роз'єднання контактів температура досягає температури плавлення, між контактами виникає місток з рідкого металу. При подальшому рухові контактів місток обривається і залежно від параметрів відключаюваного кола виникає дуговий або тліючий розряд.

При виникненні дугового розряду температура катодної і анодної плям дуги досягає точки плавлення матеріалів. Висока температура контактів призводить до їх інтенсивного окислення, розпилення матеріалу контактів в оточуюче середовище, переносу матеріалу з одного електрода на інший і утворення плівок. Все це спричиняє знос контактів. Знос, пов'язаний з окисленням, утворенням на електродах плівок хімічних з'єднань матеріалів контактів з середовищем, називається хімічним зносом або корозією. Перенос матеріалу з одного електрода на інший найбільш шкідливий при постійному струмі, оскільки напрямлення переносу не змінюється, що веде до швидкого виходу контактів з ладу. Перенос матеріалу з анода на катод називається позитивною ерозією, перенос у протилежний бік – негативною. Мірою ерозії є втрата маси або об'єму контакта. Направлення ерозії і форма зносу контактних поверхонь залежить від виду розряду і величини струму. Для існування дугового розряду необхідно, щоб величини струму і напруги перевищували мінімальне значення, наведене в табл. 1. Якщо величина струму менша I_0 (табл.1), то при напрузі кола 270-330В виникає тліючий розряд або іскра.

Основними засобами боротьби з ерозією в апаратах на струми від 1 до 600 А є:

1) зменшення тривалості горіння дуги за рахунок застосування дугогасильних пристроїв;

2) застосування дугогасильних контактних матеріалів.

Для контактів, що керують струмами від часток ампера до декількох ампер, застосовують різні схемні методи зменшення ерозії.

Для забезпечення гасіння дуги і зменшення обгорання контактів апарати на великі струми (контактори, автомати, високовольтні вимикачі) забезпечують дугогасильними камерами.

З цією ж метою рухомий контакт повинен мати певну швидкість руху і хід залежно від конструкції апарата і його номінальної напруги.

3. Матеріали контактів

До матеріалів контактів висуваються такі вимоги:

- 1) висока електропровідність і теплопровідність;
- 2) стійкість проти корозії у повітрі та інших газах;
- 3) стійкість проти утворення плівок з високим питомим опором;
- 4) мала твердість для зменшення необхідної сили натиску;
- 5) висока твердість для зменшення механічного зносу при частих включеннях і відключеннях;
- 6) мала ерозія;
- 7) висока дугостійкість (температура плавлення);
- 8) високі значення струму і напруги, необхідні для дугоутворення;
- 9) простота обробки, низька вартість.

Основними контактними матеріалами є мідь, срібло, алюміній, вольфрам, металокераміка.

КМК-10А – срібло, окис кадмія;

КМК- А 20 – срібло, окис міді;

КМК- А 31 – срібло, нікель;

КМК- А 60 – срібло, вольфрам, нікель;

КМК- А 61 – срібло, вольфрам, нікель;

КМК- Б 20 – мідь, вольфрам, нікель.

4. Конструкція контактів

а) Жорсткі контакти

Контакти служать для нерухомого з'єднання струмоведучих деталей. До останніх відносяться шинні з'єднання, з'єднання кабелів, місця приєднання апаратів до кола. У процесі експлуатації обидва контакти зв'язуються або за допомогою болтів, або за допомогою гарячої чи холодної зварки.

При болтовому з'єднанні мідних шин перед збиранням шини старанно зачищають від окислів, змазують технічним вазеліном. Після збирання весь контакт у цілому, особливо шви повинні бути покриті вологостійким лаком або фарбою. Таке приготування

контактів зменшує перехідний опір і робить його стабільним протягом часу. Покриття поверхонь, що співторкаються, оловом (лудіння) небагато збільшує кількість площадок зминання. Для відповідальних деталей, особливо при великих номінальних струмах, рекомендується сріблення поверхонь. Алюміній на повітрі піддається сильній корозії. Зачистку поверхонь виконують під вазеліном. Після зачистки брудний вазелін міняють на чистий і контакти з'єднують за допомогою болтів. Болтові з'єднання поводять себе себе недосить надійно, особливо при алюмінієвих контактах. Тому алюмінієві контакти з'єднують за допомогою холодного або термічного зварювання. Величина моменту при затягуванні болтів контактта контролюється спеціальним моментним ключем.

б) Нерозмикальні контактні з'єднання

Такі з'єднання використовують для того, щоб передати струм з рухомого контакта на нерухомий або для того, щоб дати можливість елементу нерухомого контакта мати невелике переміщення під дією рухомого контакта. Напротішим з'єднанням такого типу є гнучкий зв'язок. Для отримання необхідної еластичності зв'язок виготовлюється з мідної латуні товщиною $0,1 \cdot 10^{-3}$ м і менше, або з багатожильного плетеного провідника, що складається з мідних жил діаметром $0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Гнучкий зв'язок при роботі не повинен мати різких перегибів, інакше він швидко зруйнується. При великих ходах рухомих контактів довжина гучкого зв'язку є значною. Тому такий контакт використовують тільки при переміщенні рухомого контакта не більше ніж на 0,25 м. При великих ходах і великих номінальних струмах застосовують сковзаючі й роликові струмозйоми. Недоліком сковзаючих струмойомів є велика сила тертя, що потребує значних зусиль від приводного механізму. Меншу силу тертя дає роликовий контакт. Число роликів беруть залежно від номінального струму і струму короткого замикання. Цей контакт

для свого переміщення потребує невеликих зусиль, він знайшов широке застосування у сучасній апаратурі високої напруги.

в) Розривні контакти

У процесі роботи контакти великого числа апаратів розривають коло із струмом, більшим ніж мінімальний струм дугоутворення I_0 . Виникаюча електрична дуга сприяє швидкому зносу контактів.

Для надійного гасіння дуги, що утворюється при відключенні, між нерухомими і рухомими контактами необхідно створити певну відстань. У реальних апаратах ця відстань вибирається із запасом. Відстань між нерухомими і рухомими контактами в повністю відключеному апараті називається раствором контактів. Конструкція розривних контактів залежить від номінального струму, струму КЗ, режиму роботи, призначення апарата. Залежно від конструкції кріплення контактів змінюється число контактних точок торкання і стабільність контакта. Контакт, що має змогу вільно встановлюватися на поверхні, має максимальне число точок торкання. Такий контакт називається самоустановним.

У всіх без винятку апаратах є втиск (провал) контактів, що забезпечує необхідний натиск контактів. Внаслідок обгорання і зносу контактів у процесі експлуатації втиск зменшується, що призводить до зменшення сили натиску і зростання перехідного опору контактів. Тому в експлуатації втиск контактів повинен обов'язково контролюватися і знаходитися в межах, що вимагаються заводом-виготовником. Особливо це стосується апаратів, які працюють в режимі частих включень і виключень (контактори), де знос контактів інтенсивний. Допустиме зменшення провалу встановлюється заводом-виготовником і звичайно становить 50% початкового значення.

В високовольтних масляних вимикачах широко застосовується розеткова система. Рухомий контакт виконують у

вигляді круглого стержня, нерухомий – у вигляді розетки, що складається з ламелей. Така система має низький перехідний опір і дозволяє різко знизити контактний тиск на ламель. При переході від торцевого контакту до розеткового сила натиску на ламель з умов зварювання зменшується приблизно в $1/n^2$ раз, де n – кількість ламелей. При великих номінальних струмах (більше 2000А) застосовують здвоєну контактну систему. В цьому випадку апарат має основні й дугогасильні контакти. Тіло головних контактів виконують з міді, а поверхню їх торкання – із срібла, нанесеного електролітично або у вигляді припаяних срібних пластинок. Тіло дугогасильного контакту виконують з міді. Накінцевники дугогасильних контактів виконують з дугостійкого матеріалу – вольфраму або металокераміки. Зважаючи на те, що опір кола головних контактів значно менше, ніж дугогасильних., 75-80% тривалого струму проходить через головні контакти, які мають малий перехідний опір. При відключенні спочатку розходяться головні контакти і весь струм кола переходить на дугогасильні.

г) Герметизовані контакти (геркони)

Ці контакти мають високу надійність і велику швидкодію. Їх виконують із залізонікелевого сплаву, розміщують всередині скляного балончика, заповненого азотом з додаванням водню або гелію. При малих струмах тиск газу становить 10^5 Па. Якщо струм відключення рівний 2-3 А, то тиск підвищується до (4-5) 10^5 Па. У цьому випадку при проходженні струму через котушку під дією магнітного поля контакти замикаються. Після відключення котушки контакти розмикаються під дією пружних пластинок. Керувати контактами можна і за допомогою постійного магніту. При наближенні такого магніту потік проходить через контакти, відбувається їх змикання, при віддаленні – розмикання.

Для отримання надійного контакту поверхні торкання покривають тонким шаром золота, радія або срібла. Перед установкою контакти нагрівають до високої температури, при якій вони звільняються від шкідливих окислів і забруднень.

Завдяки тому, що контакти ізольовані від оточуючого середовища і працюють в атмосфері інертного газу, надійність їх мінімум на два порядки вище, ніж у звичних контактів у повітрі, і досягає $2 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$ комутацій.

Відсутність електромагнітної системи, яка властива електромагнітним реле, в три рази скорочує час спрацювання і відпускання. Ці контакти завдяки їх перевагам застосовують в апаратах високої напруги до 10кВ.

Недоліком герконів є вібрація контактів при змиканні, недостатня удароміцність. Тривалість вібрацій залежить від багатьох факторів і коливається в межах 0,3-1 мс.

Питання для самоперевірки

1. Фактори, що впливають на опір контактів.
2. Процес нагрівання контактів.
3. Конструкції контактів.

ТЕМА 5. ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА ТА МЕТОДИ ЇЇ ГАСІННЯ

План

1. Загальні відомості
2. Дуга постійного струму
3. Дуга змінного струму
4. Методи гасіння дуги

1. Загальні відомості

У комутаційних електричних апаратах, що призначені для замкнення і розімкнення кола зі струмом, при вимиканні виникає розряд в газі або у вигляді тліючого розряду, або дуги. Тліючий розряд виникає тоді, коли струм, що вимикається, нижче 0,1 А, а напруга на контактах досягає величини 250-300 В. Такий розряд зустрічається на контактах малопотужних реле або як перехідна фаза до розряду у вигляді електричної дуги. Якщо струм в колі і напруга вище мінімального значення напруги і струму, необхідних для підтримки дугового розряду, то має місце дуговий розряд. Основні властивості такі:

1) дуговий розряд має місце тільки при струмах значної величини. Мінімальний струм дуги для металів складає приблизно 0,5 А;

2) температура центральної частини дуги дуже велика і в апаратах може досягати 6000-1800 К;

3) щільність струму на катоді дуже велика і досягає 10^2 - 10^3 А/мм²;

4) падіння напруги на контактах біля катода становить 10-20 В і практично не залежить від струму.

У дуговому розряді розрізняють три характерні області: білякатодну, область дугового стовпа і біляанодну область. У кожній з цих областей процеси іонізації і деіонізації протікають по-різному залежно від умов, які там існують. Оскільки результуючий струм, що протікає через ці області, однаковий, в кожній з них відбуваються процеси, що забезпечують виникнення необхідної кількості зарядів.

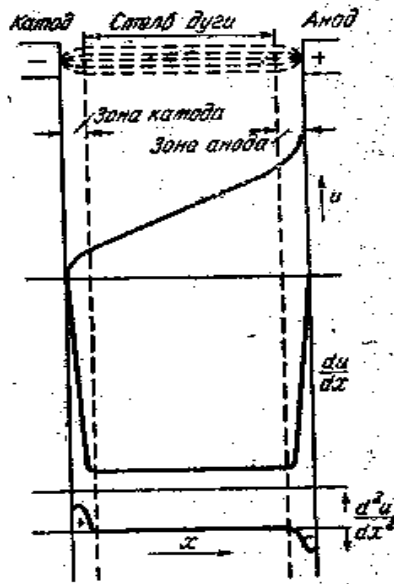


Рис. 1 – Розподіл напруги, напруженості електричного поля й об'ємного зарядів в електричній дузі.

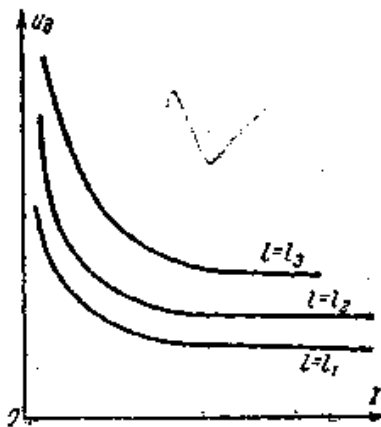


Рис.2 – Вольт-амперні характеристики дуги.

2. Дуга постійного струму

Найважливішою характеристикою дуги є залежність напруги на ній від величини струму. Ця характеристика називається вольт-амперною. Із зростанням струму збільшується температура дуги, посилюється термічна іонізація, зростає кількість іонізованих частинок в розряді і падає електричний опір дуги r_d . Напруга на дузі становить $i r_d$. При збільшенні струму опір дуги зменшується настільки різко, що напруга на дузі падає, незважаючи на те, що струм у колі зростає. Кожному значенню струму в сталому режимі відповідає свій динамічний баланс кількості заряджених частинок. При більшому значенні струму збільшується кількість виникаючих зарядів. Але при цьому зростає число зникаючих зарядів, так що результуюча швидкість зміни чисельності заряджених часток при новому значенні струму дорівнює нулю. При переході від одного значення струму до іншого тепловий стан дуги не змінюється миттєво. Якщо струм змінюється протягом часу повільно, то теплова інерція розряду не проявляється. Кожному значенню струму відповідає однозначне значення опору дуги або напруги на ній. Залежність напруги на дузі від струму при повільному його зміні називається статичною вольт-амперною характеристикою дуги. Статична характеристика дуги залежить від відстані між електродами (довжина дуги), матеріалу електродів і параметрів середовища, в якому дуга горить. Напругу на дузі U_d можна розглядати як суму навколоелектродних падінь напруги U_e і падіння напруги в стовпі дуги:

$$U_d = U_e + E l, \quad (5)$$

де E – напруженість електричного поля в стовпі дуги; l – її довжина.

Величина E залежить від струму і умов, в якому горить дуга. Статичні вольт-амперні характеристики дуги мають вид кривих, показаних на рис.2. Чим більша довжина дуги, тим вище лежить її статична вольт-амперна характеристика. Із зростанням тиску середовища, в якому горить дуга, зростає також напруженість E і піднімається вольт-амперна характеристика.

Охолодження дуги суттєво впливає на цю характеристику. Чим інтенсивніше охолодження дуги, тим більша від неї відводиться потужність. При цьому повинна зростати потужність, що виділяється дугою. При заданому струмі це можливо за рахунок збільшення напруги дуги. Таким чином, із зростанням охолодження вольт-амперна характеристика піднімається. Цим широко користуються в дугогасильних пристроях апаратів.

б) умови стабільного горіння і гасіння дуги

Розглянемо баланс напруг у колі (рис.2) при дузі, що має незмінну довжину:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + U_{\delta} . \quad (6)$$

Видно, що стаціонарним режимом буде такий, при якому струм в колі не змінюється, тобто $di/dt=0$. В електричних апаратах застосовуються всі засоби для того, щоб дуга гасла в мінімально короткий час. Очевидно, для гасіння дуги при всіх значеннях струму напруга $L di/dt$ повинна бути негативною. Для виконання цієї умови необхідно, щоб $U_{\delta} > U - iR$. Це можливо або за рахунок піднімання вольт-амперної характеристики, або за рахунок збільшення опору кола. Вольт-амперну характеристику дуги можна підняти за рахунок збільшення довжини дуги, інтенсивного охолодження, підвищення тиску середовища, в якому горить дуга. При замкнених контактах дуга відсутня і струм кола дорівнює $I_k = \frac{U}{R}$. При розведенні контактів між ними виникає дуга зі струмом I_2 . Якщо довжина дуги і напруга джерела незмінні, то при збільшенні опору струм в колі буде зменшуватися. При подальшому зростанні опору витримується нерівність $U_{\delta} > U - iR$, тобто створюються умови для гасіння дуги. Струми і опори, при яких настають умови для гасіння, називаються критичними. Якщо при незмінному значенні струму кола I_k збільшити напругу живлення U або при незмінному

значенні напруги U збільшити струм в колі I_k , то $U-iR$ забезпечить краще гасіння дуги. Тоді для дотримання умов гасіння дуги $U_\delta > U - iR$ треба підняти вольт-амперну характеристику дуги.

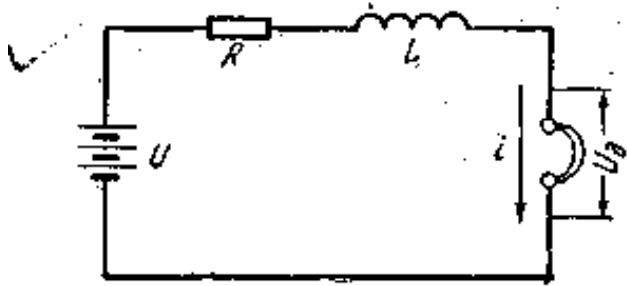
Таким чином, із зростанням відключуваного струму і напруги джерела умови відключення погіршуються. Аналіз цього процесу показав, що за рахунок зміни опору R можна зняти статичну характеристику тільки при струмах до $I_{кр}$. Для того щоб зняти цю залежність при менших струмах, необхідно збільшити напругу джерела живлення. Визначимо тривалість t_d горіння дуги.

Позначимо $\left|L \frac{di}{dt}\right|$ через ΔU :

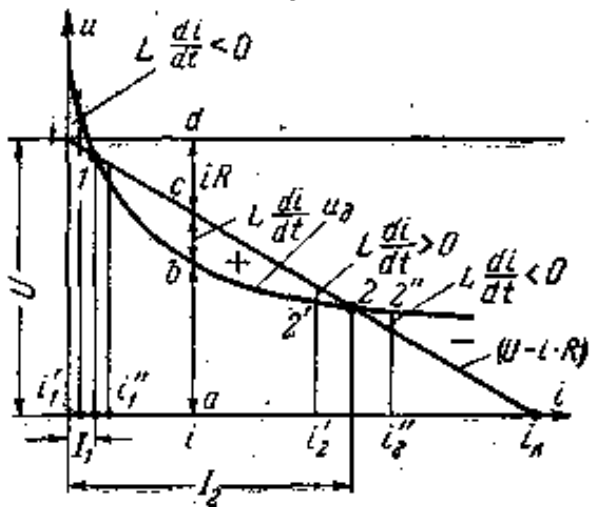
$$\Delta U = \left|L \frac{di}{dt}\right|.$$

Виконаємо інтегрування і отримаємо

$$t_\delta = L \int_{I_k} \frac{di}{dU}. \quad (7)$$



a)



b)

Рис. 2 – До розгляду балансу напруг при незмінній довжині дуги.

3. Дуга змінного струму

Розглянемо коло, в якого $\cos \varphi \approx 1$ (рис.3). Нехай контакти апарату розійшлися в якій-небудь точці а. Між ними загоряється дуга. До кінця напівперіоду внаслідок зменшення струму і впливу дугогасильного пристрою спостерігають збільшення опору дугового проміжку і підйом напруги на дузі. При підході струму до нуля до дуги підводиться мала потужність, температура її зменшується, що, з одного боку, призводить до уповільнення термічної іонізації, а з другого – сприяє деіонізації. Все це призводить до гасіння дуги. Напруга, при якій дуга гасне, називається напругою або піком гасіння U_g . Різкий підйом напруги до кінця напівперіода призводить до того, що струм у колі обривається до свого природного проходження через нуль. Після погасання дуги дуговий проміжок не перетворюється миттєво на ізоляційний, оскільки температура не знижується до нуля. У процесі гасіння дуги чисельність заряджених частинок в області дугового проміжку зменшується, після гасіння дуги опір проміжка різко зростає. При цьому зростає й електрична міцність проміжку, тобто така напруга, при якій відбувається його електричний пробій. Після проходження напруги через нуль напруга джерела змінює знак і починає зростати за законом синусоїди. Електрична міцність проміжку починає зростати не з нуля, а із значення, відповідного точці a_1 (початкова міцність проміжку). Початкова міцність проміжку і подальше зростання міцності залежать від властивостей дугогасильного пристрою: чим ефективніше він діє, тим більше початкова міцність, тим крутіше йде зростання цієї міцності. Розглянемо випадок, коли електрична міцність поновлюється за кривою $a_1 v_1$. В момент t_1 , напруга на проміжку пересікає криву міцності. У цій точці дуга загоряється знову. Напруга U_3 називається напругою запалення. У зв'язку з тим, що струм у першій половині напівхвилі синусоїди зростає, напруга на дузі зменшується. Після проходження струмом максимального значення напруга на дузі починає зростати, оскільки струм зменшується. Таким чином, крива напруги на дузі має сідловидну форму. При великих струмах

через сильну термічну іонізацію майже протягом всього напівперіоду горіння дуги напруга не змінюється. Тільки на початку і в кінці напівперіоду з'являються піки запалення і гасіння. У точці O' дуга знову гасне і відбуваються процеси, аналогічні описаним раніше. У момент підходу струму до нуля в точці O' дуга має більш високу температуру порівняно з температурою в кінці безструмової паузи t_1 . Тому пік гасіння дуги завжди менше піка запалення.

У момент O' внаслідок розходження контактів довжина дуги зростає, при цьому збільшується інтенсивність впливу дугогасильного пристрою (більш ефективно відведення тепла). У результаті початкова міцність поміжку і крутизна її

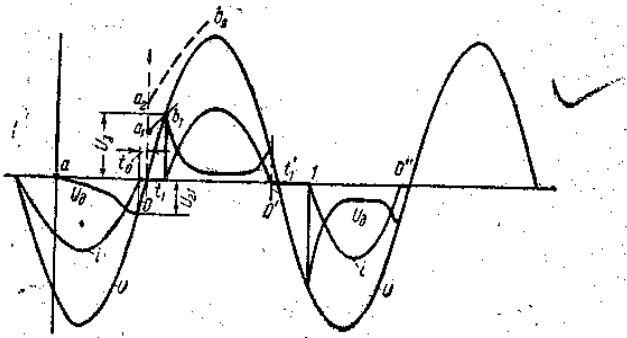


Рис. 3 – Процес вимикання активного кола змінного струму. зростання в цьому нулі більша, ніж в попередньому.

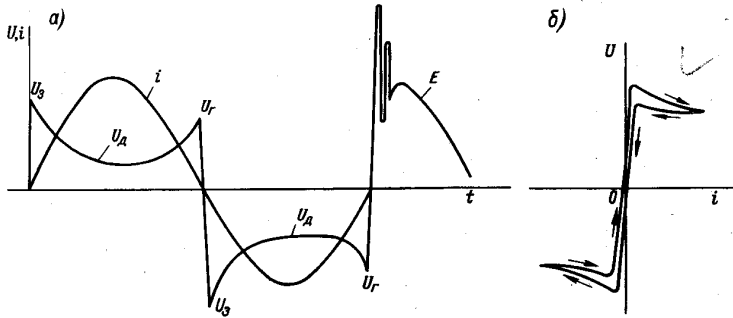


Рис. 4 – Характеристики дуги при змінному струмі.

Тому пауза струму t_1' збільшується порівняно з t_1 . Однак і в цьому нулі гасіння не відбулося. Дуга загорілася знову. Внаслідок збільшення довжини дуги при розходженні контактів напруга на дузі в цьому напівперіоді більше, ніж в попередньому. Остаточне гасіння відбулося в точці O'' . Для випадку, коли електрична міцність проміжка зростає за кривою a_2b_2 , гасіння дуги відбувається при першому ж проходженні струму через нуль. Оскільки навіть при частоті 50 Гц струм у дузі змінюється досить швидко, то ми тут маємо справу з динамічною вольт-амперною характеристикою (рис.9). Ділянки 1 і 2 відносяться до першої половини напівперіоду, 3 і 4 – до другої.

Відключення індуктивного кола на змінному струмі.

Процес поновлення напруги

Розглянемо процес відключення індуктивного кола ($\cos \varphi \leq 0,15$), схема заміщення якого подана на рис.10. Тут L – індуктивність, що відповідає реактивному опору короткого замикання джерела, $X_k = \omega L$; R – активний опір кола; C_e – еквівалентна ємність на затисках вимикача. Ця ємність визначається ємністю джерел живлення, ємністю різних електричних апаратів і шин S_3 відносно землі. Обмотки генераторів, трансформаторів, реакторів мають розподілену ємність. Для спрощення розрахунків від розподіленої ємності переходять до зосередженої. Величина цієї ємності така, що разом з індуктивністю L вона дає частоту f_0 , рівну частоті першої гармоніки реальної обмотки. Індуктивність обмотки L при власній частоті f_0 зменшується порівняно з індуктивністю при $f = 50$ Гц за рахунок розмагнічуючої дії масивних провідників обмоток генераторів, трансформаторів та іншого обладнання при високих частотах f_0 . Нехай напруга на дузі під час її горіння дуже мала і нею можна знехтувати (опір дуги рівний нулю), і що після гасіння дуги опір її одразу стає безмежно великим. Дуга з такою характеристикою називається ідеалізованою. Тоді процес зміни напруги на контактах можна подати так: при горінні дуги ємність C_e закорочена і напруга на ній дорівнює нулю. Після проходження струму через нуль дуга гасне і ємність C_e розмикається. Починається заряд ємності C_e від джерела через індуктивність L і опір R . Зважаючи на те, що $\cos \varphi$ близький до нуля, можна вважати, що миттєве значення ЕДС джерела в момент проходження струму через нуль (миттєва зростаюча напруга) рівне амплітуді E (рис.6, а). Оскільки тривалість перехідного процесу зміни напруги при гасінні в багато разів менше часу на півперіоді зміни ЕДС, можна вважати, що заряд ємності C_e через індуктивність L і опір R проходить при незмінному значенні ЕДС, рівному E . Напруга на ємності для розглядуваної дуги змінюється за законом

$$U = E(1 - e^{-pt} \cos \omega_0 t), \quad (14)$$

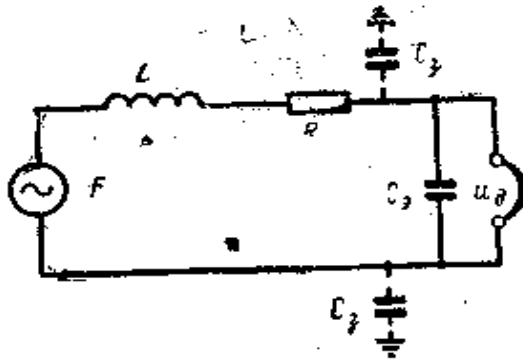


Рис. 5 – Схема заміщення кола короткого замикання при вимиканні.

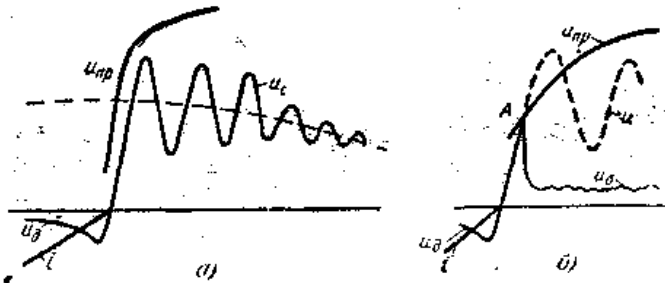


Рис. 6 – До ілюстрації явища поновлення напруги в різних випадках.

4. Методи гасіння дуги

Способи гасіння дуги в комутаційних апаратах напругою до 1 кВ

- видовження дуги (під час швидкого розходження контактів);
- ділення довгої дуги на декілька коротких (рис. 7 (а));
- затягування дуги в дугогасильну камеру;
- обертання дуги в магнітному полі (рис. 7 (б,в)).

Способи гасіння дуги в комутаційних апаратах напругою вище 1 кВ

- гасіння дуги в оливі (рис. 7 (г));
- газоповітряне дугтя (рис. 7 (д));
- багатократний розрив електричного кола (рис. 8);
- гасіння дуги у вакуумі;
- гасіння дуги в газах високого тиску.

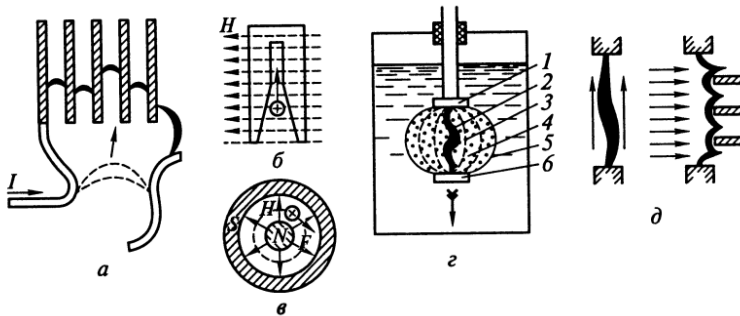


Рис. 7 - Способи гасіння дуги в комутаційних апаратах:
 а – ділення довгої дуги на декілька коротких; б – затягування дуги в дугогасильну камеру;
 в – обертання дуги в магнітному полі;
 г – гасіння дуги в оливі (1 – нерухомий контакт; 2 – дуга; 3 – воднева оболонка; 4 – зона газу; 5 – зона парів оливи; 6 – рухомий контакт);
 д – газоповітряне дуття.

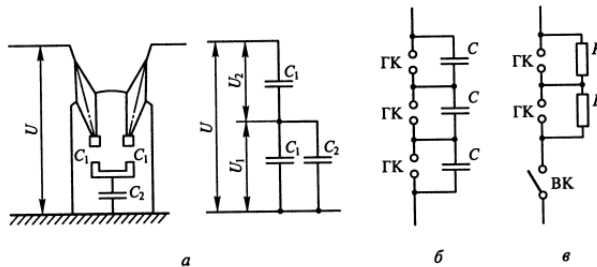


Рис. 8 – Розподіл напруги за розривами контактів масляного вимикача (а), смісні ділянки напруги (б), активні ділянки напруги (в)

Співвідношення напруг на розривах контактів:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Питання для самоперевірки

1. Процес розмикання електричного кола під час к.з.
2. Фізичні процеси в дуговому проміжку вимикача за високого тиску.
3. Гасіння дуги в масляних вимикачах.
4. Характерні властивості повітряних та масляних вимикачів.

ТЕМА 6. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ НАПРУГОЮ ДО 1 КВ

План

1. Неавтоматичні вимикачі
2. Запобіжники
3. Автоматичні вимикачі
4. Контактори та пускачі
5. Безконтактні комутаційні пристрої

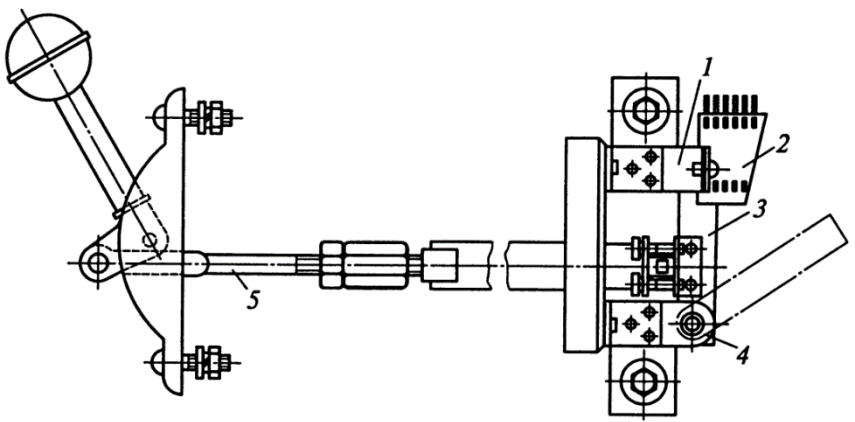
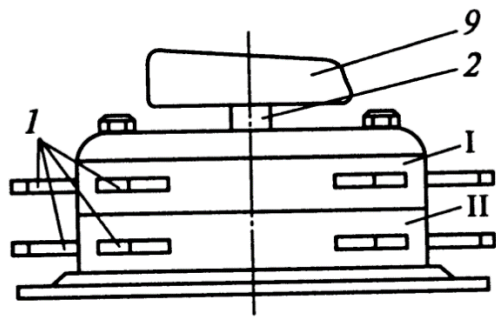
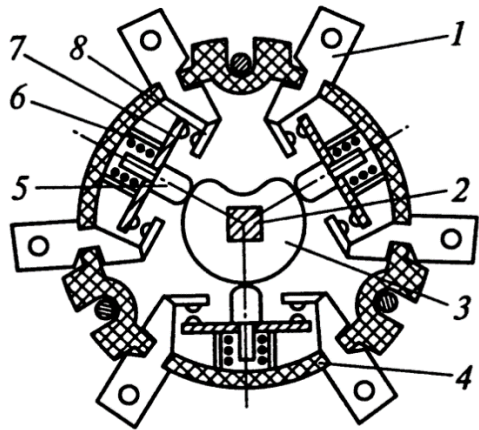
1. Неавтоматичні вимикачі

Неавтоматичні вимикачі призначені для комутації електричних кіл за струмів, які не перевищують 0,2-1 відномінального.

До них відносяться рубильники, пакетні вимикачі та перемикачі.

Умови вибору рубильників:

- за конструкцією;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_m$ (U_n – номінальна напруга апарата; U_m – номінальна напруга мережі);
- за номінальним струмом $I_n \geq I_{p,max}$ (I_n – номінальний струм апарата; $I_{p,max}$ – максимальний робочий струм);
- за електродинамічною стійкістю $i_{max} \geq i_y$ та (або) $I_{max} \geq I_y$ (i_{max} , I_{max} – відповідно максимальний допустимий амплітудний та діючий струм апарата; i_y , I_y – відповідно миттєве та діюче значення ударного струму к.з. в точці встановлення);
- за термічною стійкістю $I_t^2 t \geq I_K^2 t_\phi$ (I_t – струм термічної стійкості апарата, вказаний в його паспорті для часу проходження t ; I_K – діюче розрахункове значення усталеного струму к.з. в точці встановлення; t_ϕ – фіктивний час к.з., який для сільських мереж приймається рівним дійсному часу к.з.).



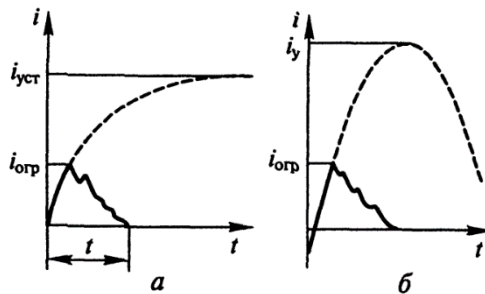
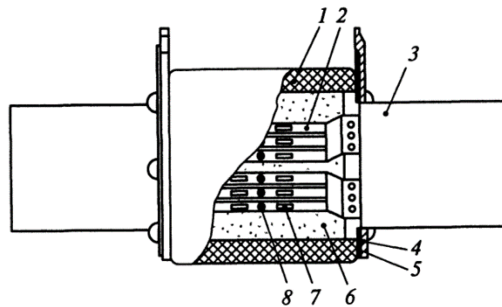
2. Запобіжники

Запобіжник - це комутаційний апарат, що призначений для вимикання електричного кола при к.з. та перевантаженнях.

Запобіжники вибираються за такими умовами:

- за номіальною напругою;
- за номіальним струмом патрона запобіжника;
- за номіальним струмом вимикання;

- за номіальним струмом плавкої вставки, яка вибирається за умовою селективності дії запобіжників та автоматичних вимикачів миттєвої дії, встановлених з нижчої сторони, а також з урахуванням пускових струмів двигунів і кидків струму намагнічування трансформаторів.



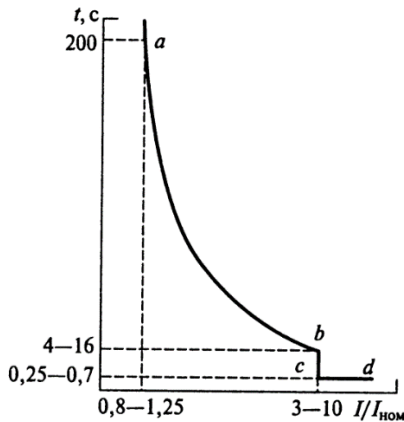
3. Автоматичні вимикачі

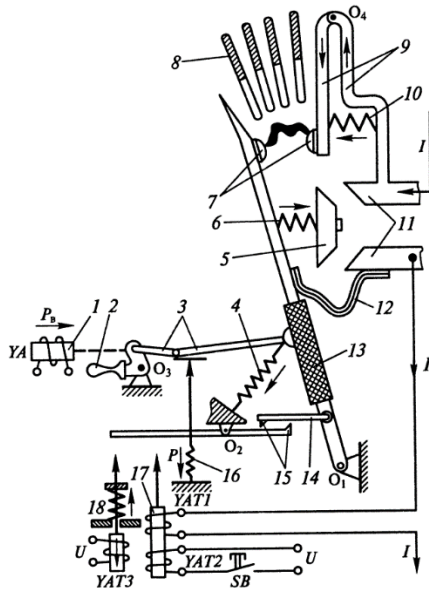
Автоматичний вимикач – це комутаційний апарат, що призначений для автоматичного вимикання електричного кола під час перевантажень та к.з., а також при ряді інших ненормальних режимів (наприклад, збільшенні або зниженні напруги). Автомати допускається використовувати лише для нечастих (до 30 разів на добу) ручних оперативних вмикань та вимикань.

Автомати мають реле прямої дії, які називаються розчіплювачами. Розчіплювачі забезпечують спрацювання автомата за певного виду ненормального режиму.

Автомати вибирають за такими критеріями:

- за конструкцією;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_M$;
- за номінальним струмом $I_n \geq I_{p,max}$;
- за струмом вмикання $i_{вмик} \geq i_y$;
- за термічною стійкістю;
- за комутуючою здатністю.





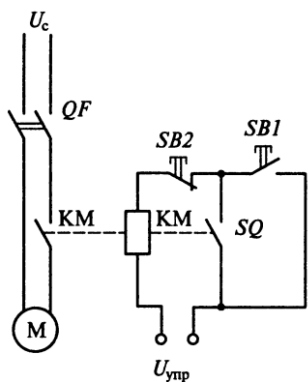
4. Контактори та магнітні пускачі

Контактор – це двопозиційний комутаційний апарат з функцією самоповернення, який приводиться в рух приводом і призначений для частих комутацій нормальних струмів. Контактори розраховані на відносно значні струми (до 1000 А) і не мають елементів захисту від ненормальних режимів.

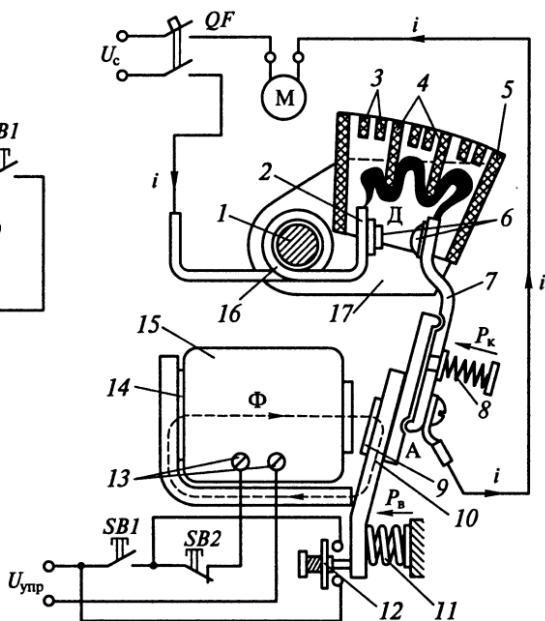
Магнітний пускач – це контактор, який використовується для керування електродвигунами, розрахований на відносно низькі струми (близько 100 А) та має елемент захисту від перевантажень – теплове реле.

Контактори та пускачі вибирають за такими критеріями:

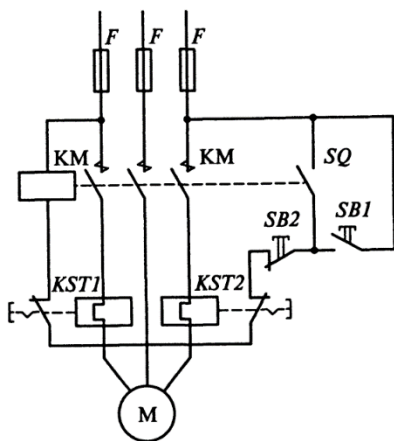
- за конструкцією;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_M$;
- за величиною та родом струму $I_n \geq I_{p,max}$.



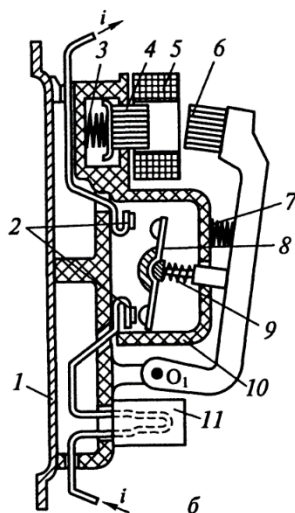
a



b



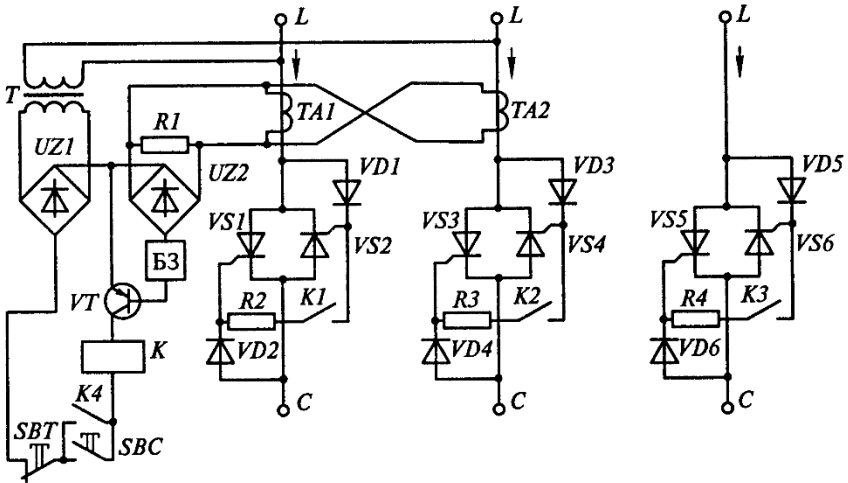
a



b

5. Безконтактні комутаційні пристрої

Безконтактні комутаційні пристрої напругою нижче 1 кВ знаходять все ширше застосування завдяки основним перевагам – відсутності контактних поверхонь, які підгорають, відсутності рухомих частин та дугогасильних камер. Виконуються вони на основі елементів силової електроніки – напівпровідникових тиристорів та симисторів.



Питання для самоперевірки

1. Призначення, будова та принцип дії неавтоматичних вимикачів.
2. Призначення, будова та принцип дії запобіжників.
3. Призначення, будова та принцип дії автоматичних вимикачів.
4. Призначення, будова та принцип дії пускачів.

ТЕМА 7. РОЗ'ЄДНУВАЧІ, КОРОТКОЗАМИКАЧІ ТА ВІДОКРЕМЛЮВАЧІ. ВИМИКАЧІ НАВАНТАЖЕННЯ. ЗАПОБІЖНИКИ

План

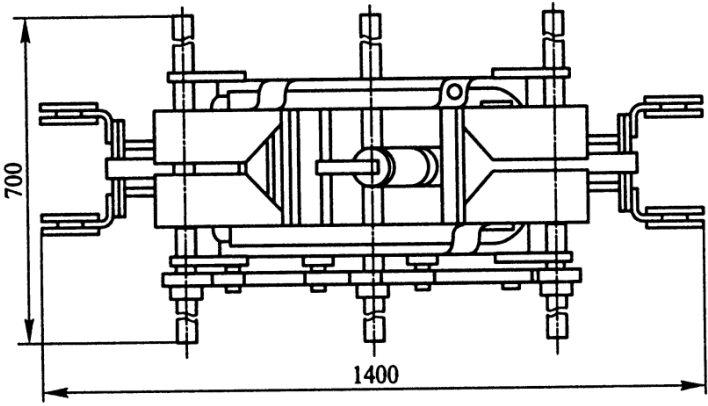
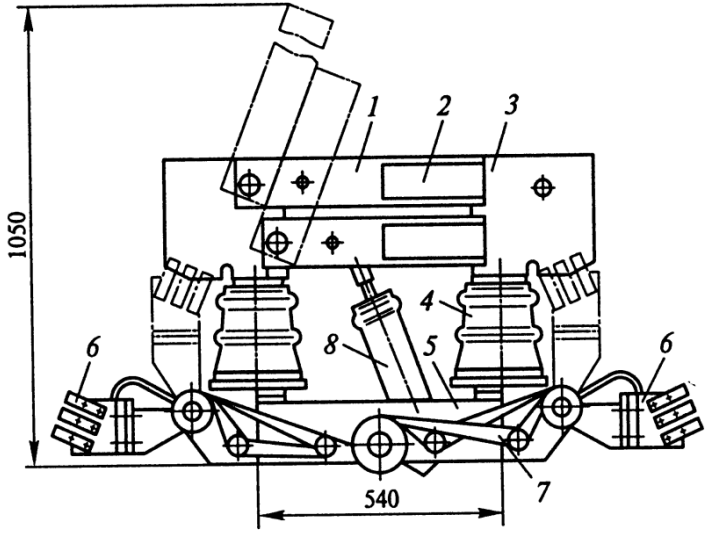
1. Роз'єднувачі
2. Короткозамикачі та відокремлювачі
3. Вимикачі навантаження
4. Високовольтні запобіжники

1. Роз'єднувачі

Роз'єднувач – це контактний комутаційний апарат, призначений для вмикання та вимикання електричного кола без струму або з незначним струмом, який у вимкненому положенні дозволяє отримати видимий розрив електричного кола, необхідний за умовою електробезпеки.

Умови вибору роз'єднувачів:

- за конструкцією та родом встановлення;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_m$ (U_n – номінальна напруга апарата; U_m – номінальна напруга мережі);
- за номінальним струмом $I_n \geq I_{p,\max}$ (I_n – номінальний струм апарата; $I_{p,\max}$ – максимальний робочий струм);
- за електродинамічною стійкістю $i_{\max} \geq i_y$ та (або) $I_{\max} \geq I_y$ (i_{\max} , I_{\max} – відповідно максимальний допустимий амплітудний та діючий струм апарата; i_y , I_y – відповідно миттєве та діюче значення ударного струму к.з. в точці встановлення);
- за термічною стійкістю (I_t – струм термічної стійкості апарата, вказаний в його паспорті для часу проходження t ; I_K – діюче розрахункове значення усталеного струму к.з. в точці встановлення; t_ϕ – фіктивний час к.з., який для сільських мереж приймається рівним дійсному часу к.з.).

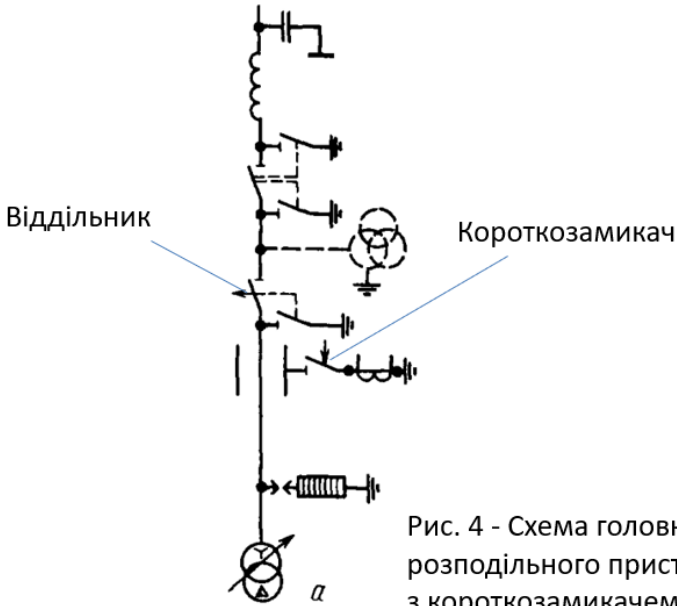


2. Короткозамикачі та відокремлювачі

Короткозамикач – це контактний комутаційний апарат, призначений для створення штучного к.з.

Віддільник – це контактний комутаційний апарат, призначений для вимикання електричного кола у безструмову паузу.

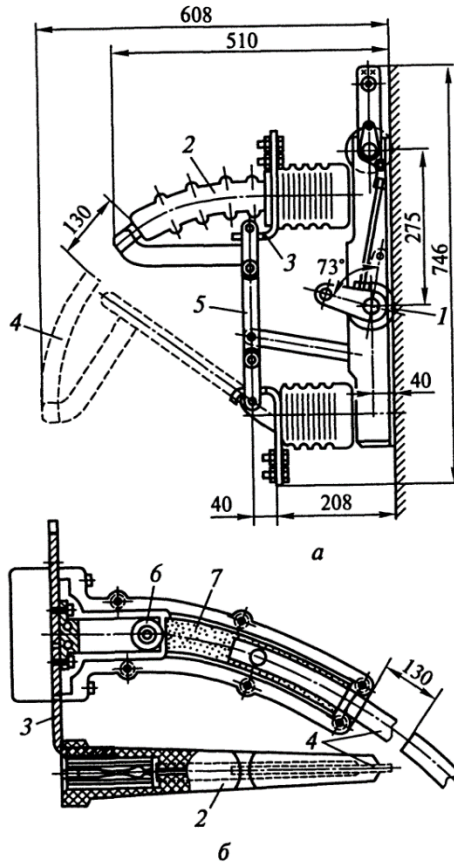
Умови вибору віддільників та короткозамикачів - аналогічні умовам вибору роз'єднувачів, для короткозамикачів перевірка за робочим струмом не проводиться.



3. Вимикачі навантаження

Вимикач навантаження – це контактний комутаційний апарат, призначений для вмикання та вимикання електричного кола з робочим струмом.

Умови вибору вимикачів навантаження - аналогічні умовам вибору роз'єднувачів.

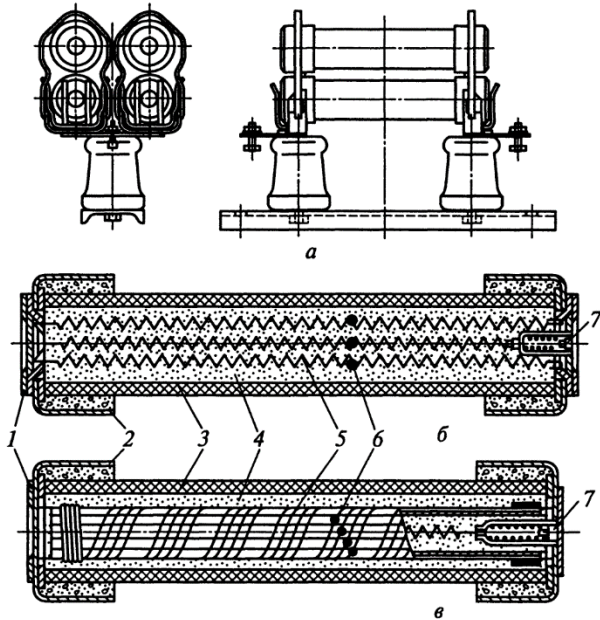


4. Високовольтні запобіжники

Запобіжник - це комутаційний апарат, що призначений для вимикання електричного кола при к.з. та перевантаженнях.

Запобіжники вибираються за такими умовами:

- за конструктивним виконанням та родом встановлення;
- за номінальною напругою;
- за номінальним струмом запобіжника;
- за номінальним струмом вимикання;
- за номінальним струмом плавкої вставки, яка вибирається за умовою селективності дії запобіжників та автоматичних вимикачів миттєвої дії, встановлених з нижчої сторони, а також з урахуванням пускових струмів двигунів і кидків струму намагнічування трансформаторів.



Питання для самоперевірки

1. Призначення, будова та принцип дії роз'єднувачів.
2. Призначення, будова та принцип дії короткозамикачів та віддільників.
3. Призначення, будова та принцип дії вимикачів навантаження.
4. Умови вибору роз'єднувачів.
5. Умови вибору короткозамикачів та віддільників.
6. Умови вибору вимикачів навантаження.

ТЕМА 8. ВИСОКОВОЛЬТНІ ВИМИКАЧІ

План

1. Високовольтні вимикачі
2. Умови вибору високовольтних вимикачів

1. Високовольтні вимикачі

Високовольтний вимикач – це комутаційний апарат, що призначений для вмикання та вимикання струмів нормального та аварійного режимів.

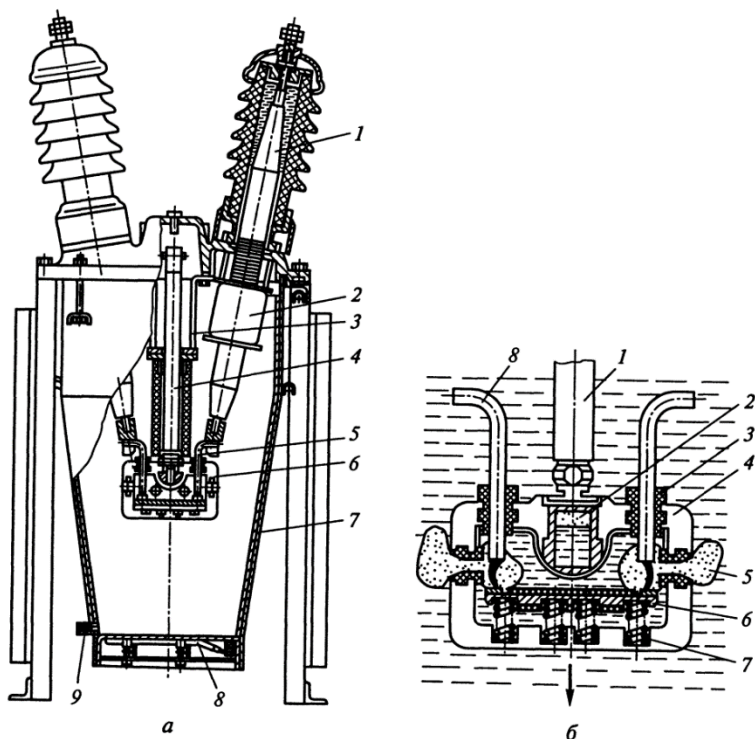


Рис. 1 - Масляний баковий високовольтний вимикач

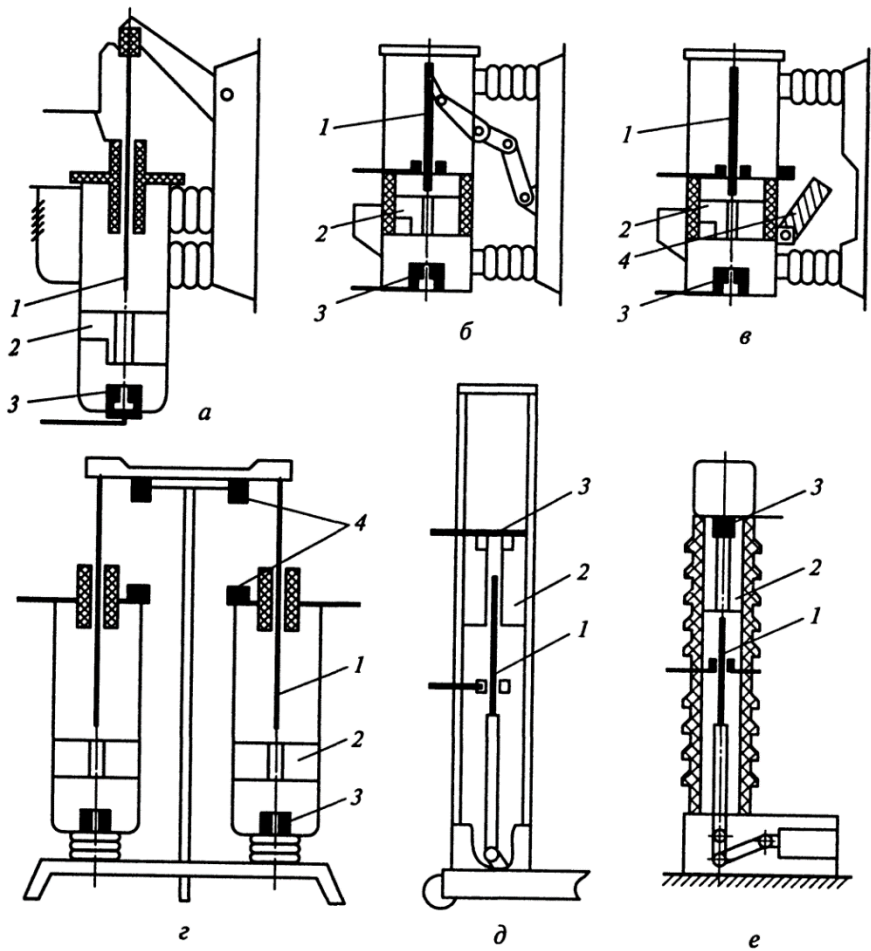


Рис. 2 - Маломасляні високовольтні вимикачі

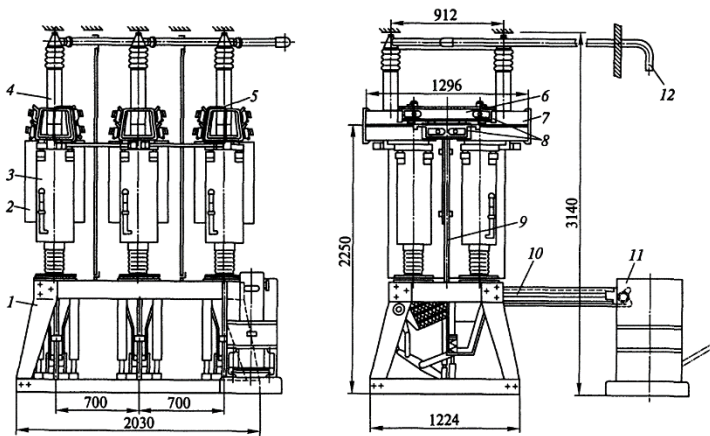


Рис. 3 - Маломасляний високовольтний вимикач ВМГ-20

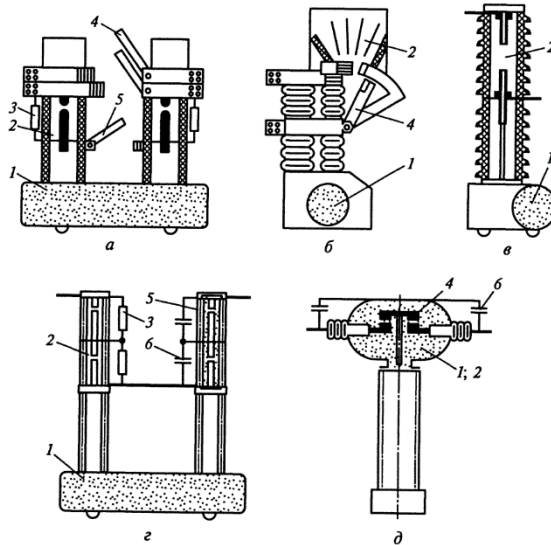


Рис.4 - Повітряні високовольтні вимикачі

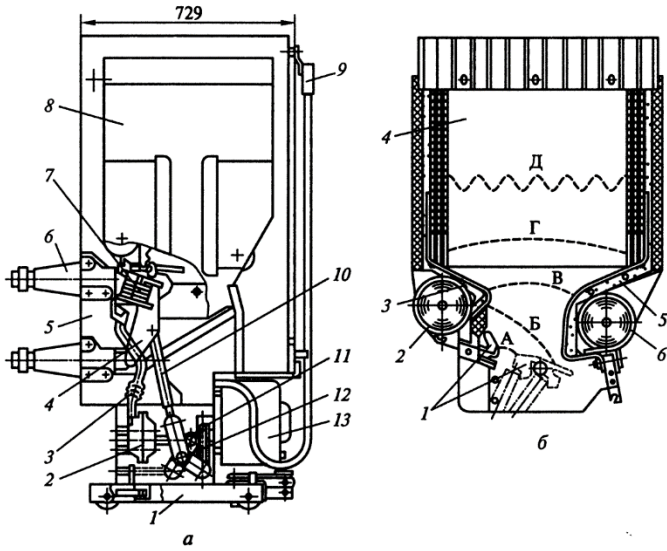


Рис. 5 - Електромагнітні високовольтні вимикачі

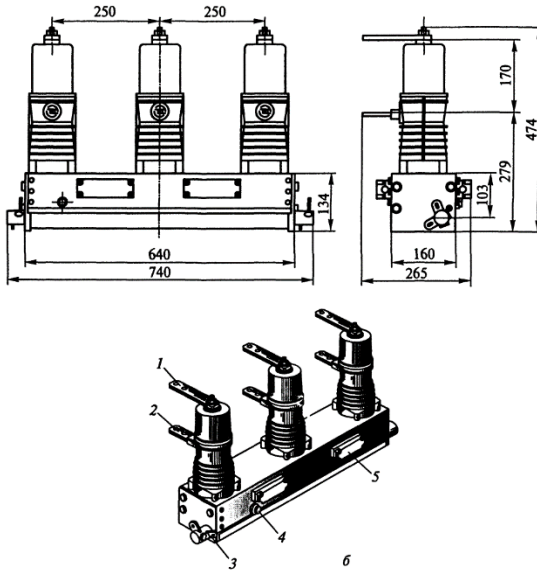


Рис. 6 - Вакуумні високовольтні вимикачі

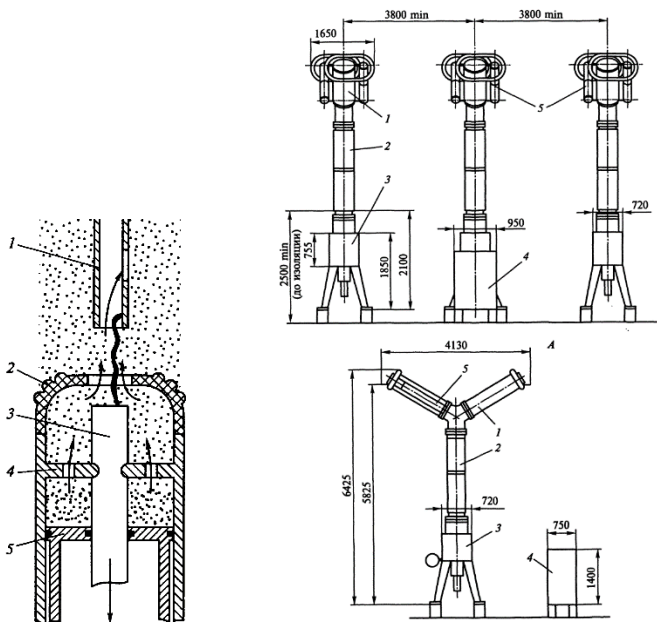


Рис. 7 - Елегазові високовольні вимикачі

2. Умови вибору високовольних вимикачів

Високовольні вимикачі вибирають за такими критеріями:

- за конструкцією та родом встановлення;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_M$;
- за номінальним струмом $I_n \geq I_{p,max}$;
- за електродинамічною стійкістю $i_{max} \geq i_y$ та (або) $I_{max} \geq I_y$;
- за термічною стійкістю;
- за вимикаючою здатністю.

Питання для самоперевірки

1. Вимоги до високовольтних вимикачів.
2. Масляні вимикачі.
3. Повітряні вимикачі.
4. Елегазові вимикачі.
5. Електромагнітні вимикачі.
6. Вакуумні вимикачі.
7. Умови вибору високовольтних вимикачів.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 4. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ. ГОЛОВНІ СХЕМИ ТА РОЗПОДІЛЬНІ ПРИСТРОЇ. СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ, КЕРУВАННЯ ТА ЗАЗЕМЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ (ЗМ4)

ТЕМА 9. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ

План

1. Загальні відомості про вимірювальні ТС
2. Конструкції ТС
3. Вибір ТС

1. Загальні відомості про вимірювальні ТС

Вимірювальний трансформатор струму – це електричний апарат, що призначений для зменшення первинного струму до величин, прийнятних для підключення вимірювальних приладів та реле зі стандартними значеннями номінальних струмів (1 або 5 А), а також для електричного відділення кіл вимірювання і захисту від первинних кіл високої напруги.

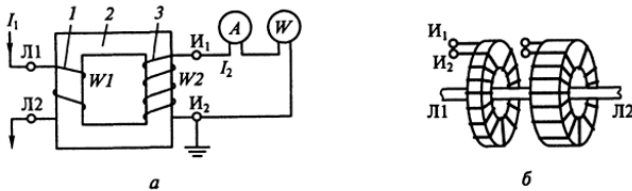


Рис. 1 – Улаштування одновиткового (а) та багатовиткового (б) ТС

Струм у первинному колі I_1 визначається на основі струму вторинного кола I_2 та номінального коефіцієнта трансформації ТС k_I :

$$I_1 = k_I I_2.$$

Номинальний коефіцієнт трансформації ТС:

$$K_I = \frac{I_{1 \text{ ном}}}{I_{2 \text{ ном}}},$$

де $I_{1 \text{ ном}}$, $I_{2 \text{ ном}}$ – номінальні значення первинного та вторинного струму відповідно.

Стандартний ряд $I_{1 \text{ ном}}$: 1; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80; 100 ... 40 000 А

Стандартне значення $I_{2 \text{ ном}}$ – 1 або частіше 5 А.

ТС мають два види похибок:

- струмову (за величиною розрахованого первинного струму);
- кутову (за кутом між вектором вторинного струму та вектором первинного струму, повернутого на 180°).

ТС випускають з різними класами точності – 0,2; 0,5; 1; 3 та 10, які чисельно рівні струмовій похибці за первинного струму $\Pi=1,0-1,2 \Pi_{\text{ном}}$ (для перших трьох класів) та $\Pi=0,5-1,2 \Pi_{\text{ном}}$ (для двох останніх класів).

Для класів 0,2; 0,5; 1 нормується також кутова похибка.

Області застосування ТС з різними класами точності:

- 0,2 – для точних лабораторних приладів;
- 0,5 – для комерційного обліку електричної енергії;
- 1 – для технічних вимірювальних приладів;
- 3 та 10 – для приєднання реле.

2. Конструкції ТС

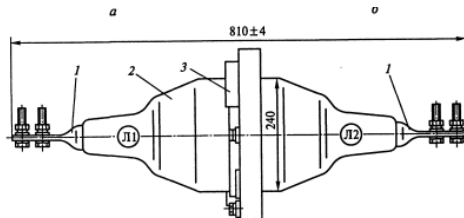
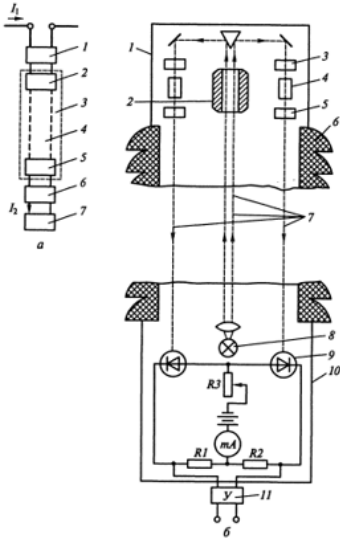
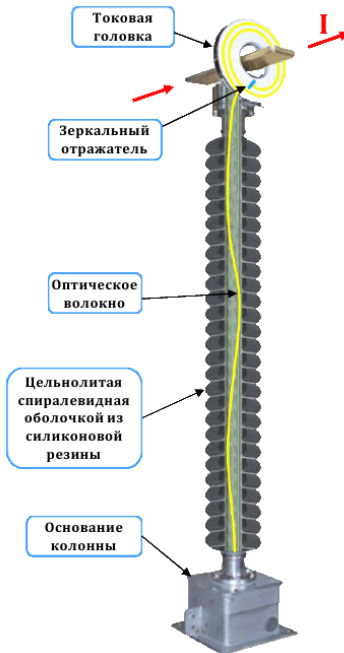


Рис. 1 - Однофазний ТС типу ТПОЛ-20



Оптико-електронні ТС
 виготовляються на високі
 номінальні напруги (вище
 500 кВ), коли важко
 ізолювати обмотки в
 електромагнітну ТС.



В основі волоконно-оптичного перетворювача струму лежить ефект Фарадея - магнітооптичний ефект, що полягає в тому, що при поширенні лінійно поляризованого світла через оптично неактивну речовину, що перебуває в магнітному полі, спостерігається обертання площини поляризації світла, що залежить від величини цього магнітного поля. Вимірювання струму засноване на принципі Фарадея з відбиттям світлової хвилі наприкінці оптичного волокна, що забезпечує незалежність вихідного сигналу датчика від температурних впливів і механічних вібрацій.

3. Вибір ТС

Умови вибору ТС :

- за конструкцією та родом встановлення;
- за класом точності;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_m$;
- за номінальним струмом $I_{In} \geq I_{Ip.max}$ (найближче більше значення);
- за електродинамічною стійкістю $i_{дин} \geq i_y$ (окрім шинних ТС);
- за термічною стійкістю;
- за вторинним навантаженням $Z_2 \leq Z_{2 ном}$ (Z_2 , $Z_{2 ном}$ – відповідно розрахункове та номінальне навантаження у вибраному класі точності ТС).

Питання для самоперевірки

1. Призначення, будова та принцип дії вимірювальних трансформаторів струму.
2. Похибки вимірювальних трансформаторів струму.
3. Умови вибору вимірювальних трансформаторів струму.

ТЕМА 10. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ НАПРУГИ

План

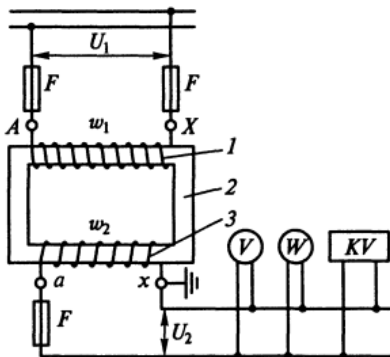
1. Загальні відомості про вимірювальні ТН
2. Конструкції ТН
3. Вибір ТН

1. Загальні відомості про вимірювальні ТН

Вимірювальний трансформатор напруги – це електричний апарат, що призначений для зменшення високої напруги до значення 100 або $100/\sqrt{3}$ В з метою підключення вимірювальних приладів та реле зі стандартними номінальними напругами, а також для електричного відділення кіл вимірювання і захисту від первинних кіл високої напруги.

Напруга у певинному колі U_1 визначається на основі напруги вторинного кола U_2 та номінального коефіцієнта трансформації ТН k_U :

$$U_1 = k_U U_2.$$



Номинальний коефіцієнт трансформації ТН:

$$K_U = \frac{U_{1\text{ ном}}}{U_{2\text{ ном}}},$$

де $U_{1\text{ ном}}$, $U_{2\text{ ном}}$ – номінальні значення первинної та вторинної напруг відповідно.

Стандартний ряд $U_{1\text{ ном}}$ відповідає ряду номінальних напруг, наприклад 6; 10; 35 кВ.

Стандартне значення $U_{2\text{ ном}}$ – 100 або $100/\sqrt{3}$ В.

ТН мають два види похибок:

- за величиною розрахованої первинної напруги

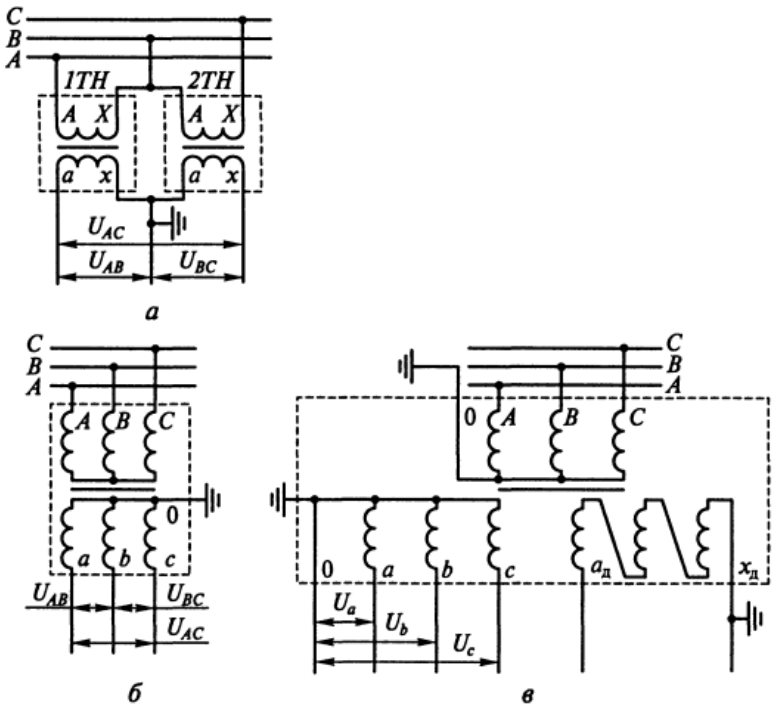
-

$$\Delta U\% = \frac{K_U U_2 - U_1}{U} 100.$$

- за кутом між вектором вторинної напруги та вектором первинної напруги, повернутим на 180° .

Класи точності ТН:

- 0,2 – для точних лабораторних приладів;
- 0,5 – для комерційного обліку електричної енергії;
- 1 – для технічних вимірювальних приладів;
- 3 – для приєднання реле.



2. Конструкції ТН

Конструкції ТН різних класів напруги наведені на рисунках 1-3.

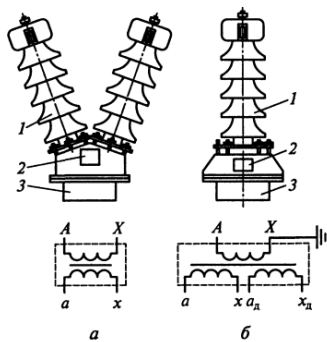


Рис. 1

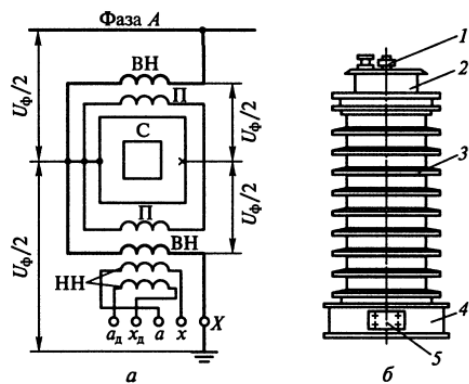


Рис. 2

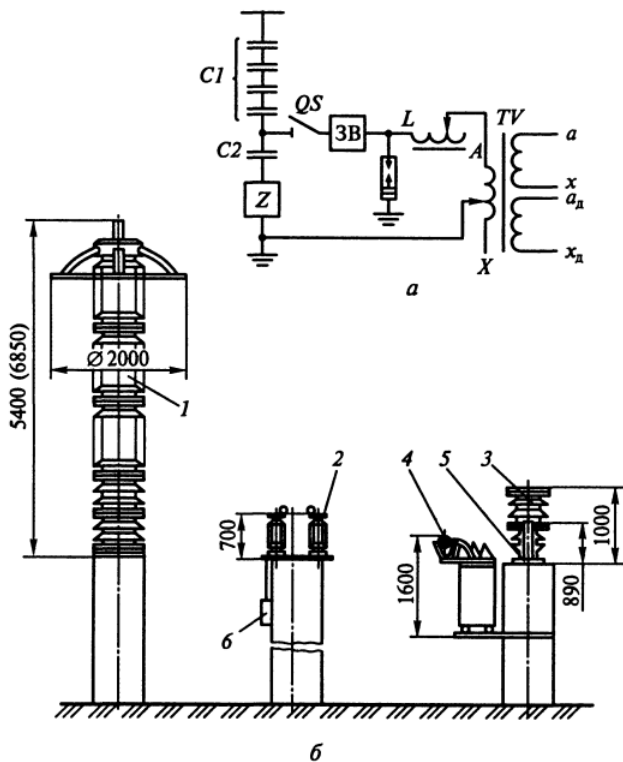


Рис. 3

3. Вибір ТН

Умови вибору ТН:

- за конструкцією та родом встановлення;
- за схемою з'єднання обмоток;
- за класом точності;
- за номінальною напругою $U_n \geq U_m$;
- за вторинним навантаженням $S_{2 \text{ ном}} \geq S_2$ (S_2 , $S_{2 \text{ ном}}$ – відповідно розрахункове та номінальне навантаження у вибраному класі точності ТН).

Питання для самоперевірки

1. Призначення, будова та принцип дії вимірювальних трансформаторів напруги.
2. Похибки вимірювальних трансформаторів напруги.
3. Умови вибору вимірювальних трансформаторів напруги.

ТЕМА 11. СХЕМИ ГОЛОВНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ

План

1. Загальні відомості про схеми електроустановок
2. Схеми електричних з'єднань на стороні 6-10 кВ
3. Схеми електричних з'єднань на стороні 35 кВ та вище
4. Головні схеми ПС

1. Загальні відомості про схеми електроустановок

Головна схема електричних з'єднань електростанції (підстанції) – це сукупність основного обладнання (генератори, трансформатори, лінії), збірних шин, комутаційної та іншої первинної апаратури зі всіма виконаними між ними в натурі з'єднаннями.

Окрім головних схем, існують структурні, оперативні, та принципові схеми електроустановок (рис. 1).

Основні вимоги до головних схем електроустановок:

- значення ЕС або ПС для енергосистеми;
- положення ЕС або ПС в енергосистемі, схеми та напруги суміжних мереж;
- категорія споживачів;
- перспектива розширення;
- придатність до ремонтів, гнучкість схеми;
- економічність.

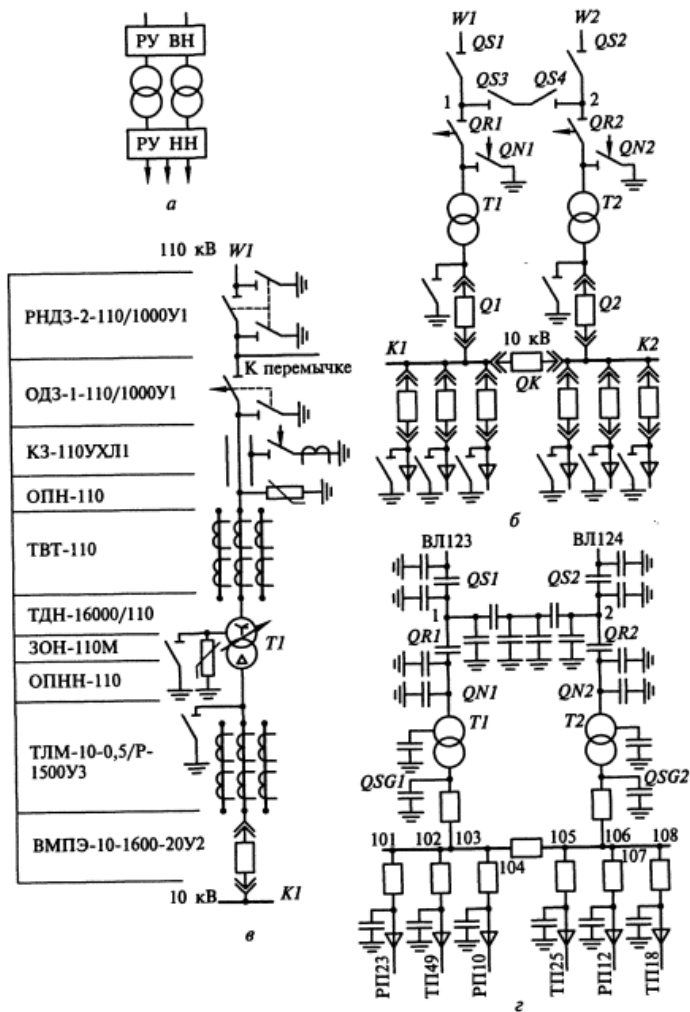
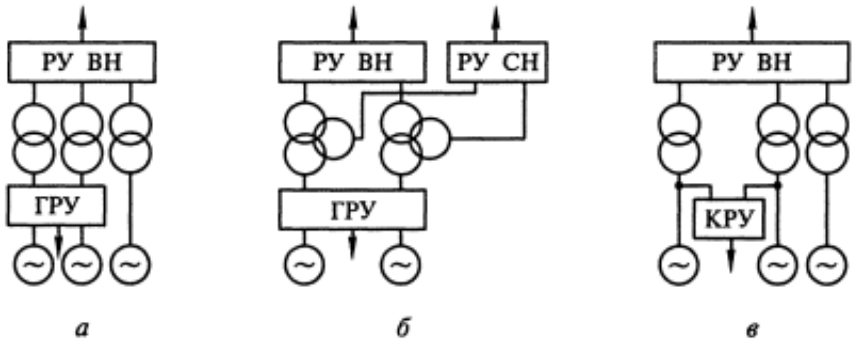
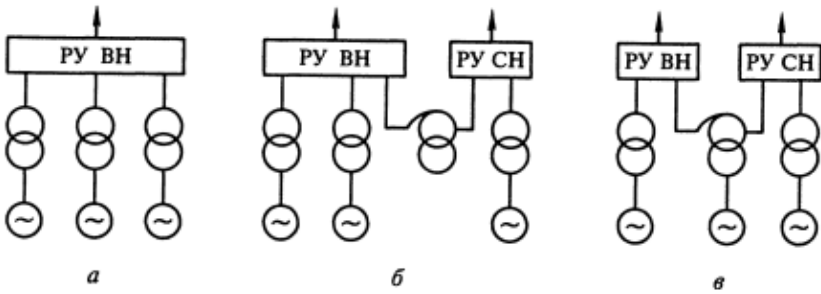


Рис. 1



а) ТЕЦ;



б) КЭС, ГЭС, АЭС;

Рис. 2 - Структурні схеми ЕС

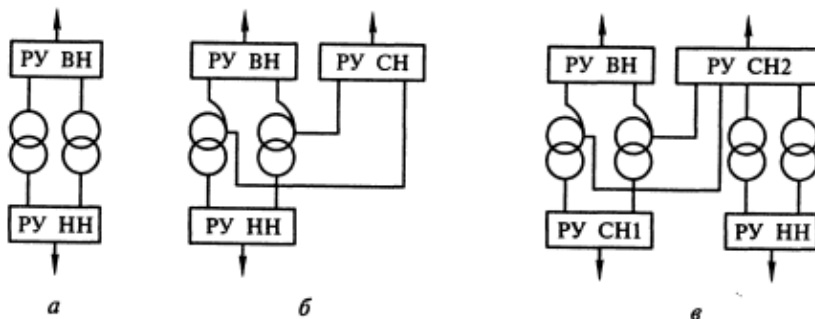


Рис. 3 - Структурні схеми ПС

Вибір кількості та потужності силових трансформаторів на ПС

Найчастіше на ПС, виходячи з вимог надійності електропостачання, встановлюють два трансформатори або автотрансформатори.

Встановлення чотирьох трансформаторів або автотрансформаторів можливе на ПС з двома середніми напругами – 220/110/35/10 кВ, 500/220/35/10 кВ та ін.

Потужність трансформатора вибирають за умовами:

- у випадку встановлення одного трансформатора:

$$S_{\text{ном}} \geq S_{\text{мах}};$$

- у випадку встановлення двох трансформаторів:

$$S_{\text{ном}} \geq 0,7 S_{\text{мах}};$$

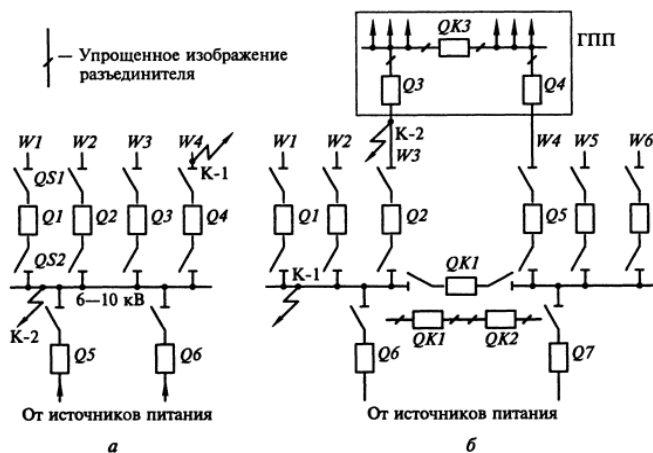
- у випадку встановлення n трансформаторів:

$$S_{\text{ном}} \geq 0,7 \frac{S_{\text{мах}}}{(n-1)},$$

де S_{max} – найбільше навантаження ПС на перспективу 5 років.

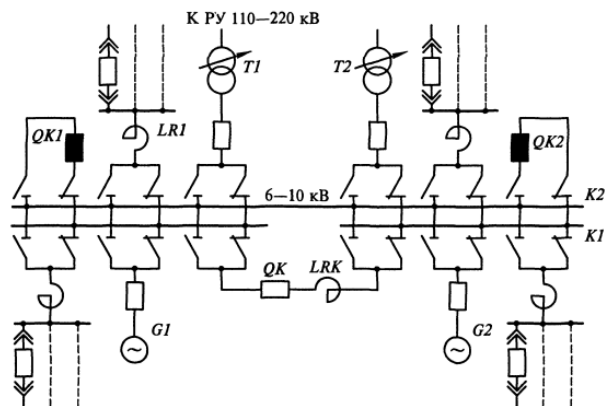
2. Схеми електричних з'єднань на стороні 6-10 кВ

I. Схема з однією системою збірних шин:



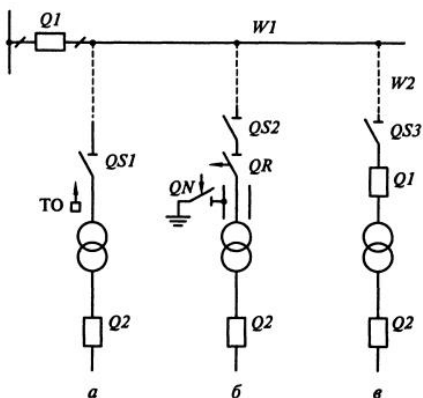
а) несекціонована; б) секціонована.

II) Схема з двома системами збірних шин:

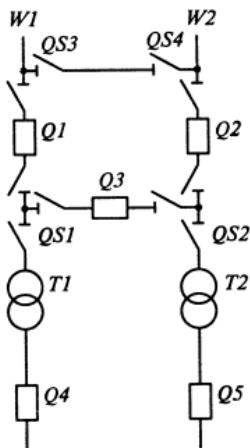


3. Схеми електричних з'єднань на стороні 35 кВ та вище

I. Спрощені схеми:

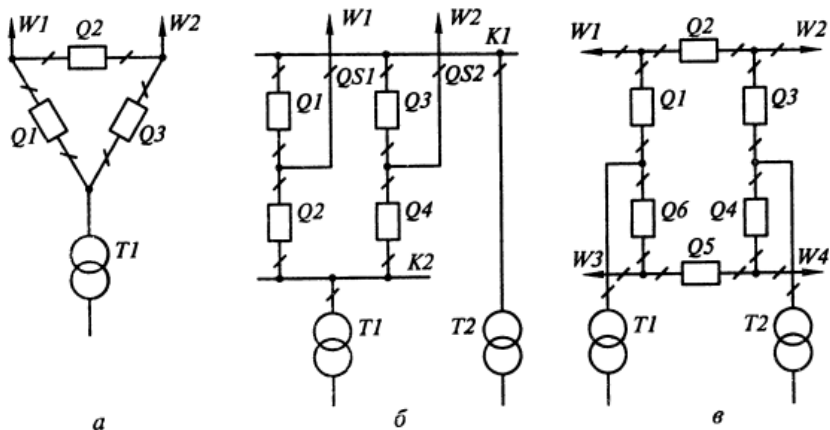


а) «трансформатор-лінія»;

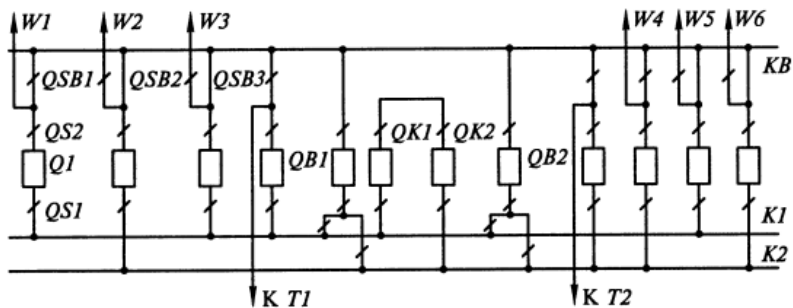


б) «місток»;

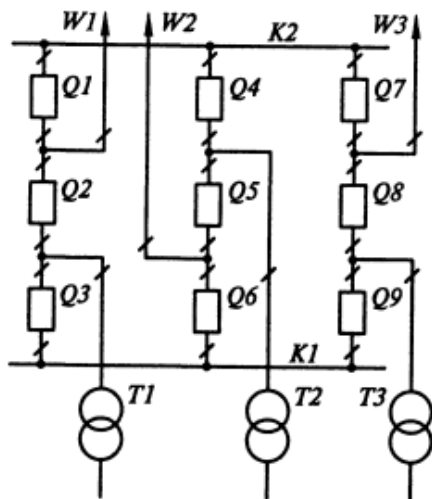
II. Кільцеві схеми



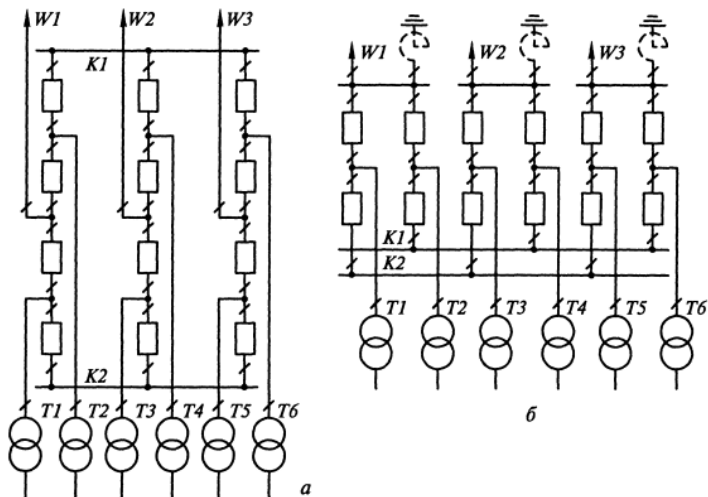
III. Схема з однією робочою та обхідною системою шин



IV. Схема з двома системами шин та трьома вимикачами на два кола



V. Схема з двома системами шин та чотирма вимикачами на три кола



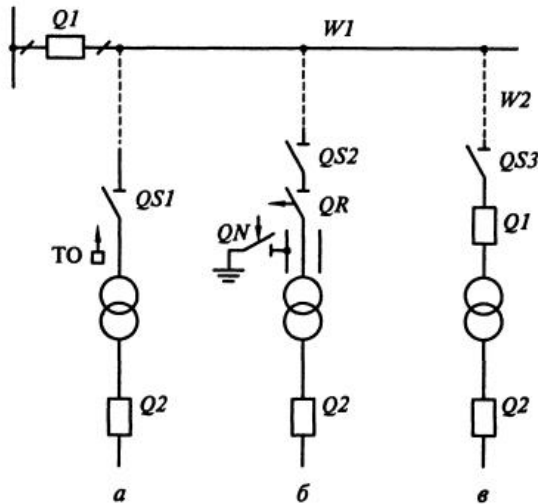
б

4. Головні схеми ПС

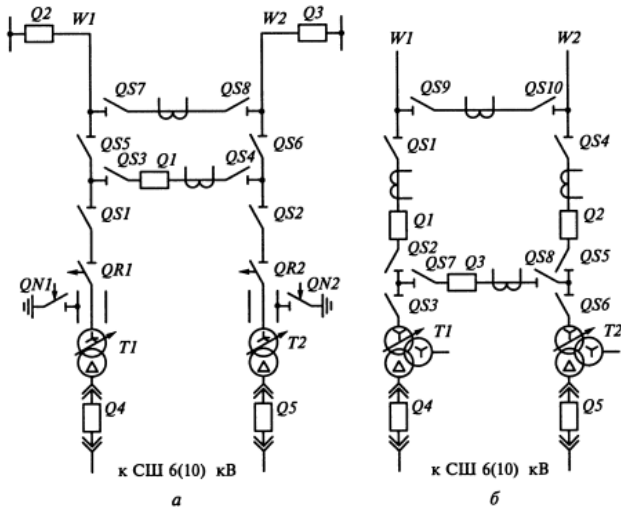
За способом приєднання до мережі ПС поділяють на:

- тупикові – отримують живлення від одного джерела по одній або двох лініях;
- відгалужувальні – приєднуються глухим відгалуженням до однієї або двох ліній;
- прохідні – вмикаються в розсічку лінії (ліній);
- вузлові – ПС, до якої приєднано більше двох ліній живлення.

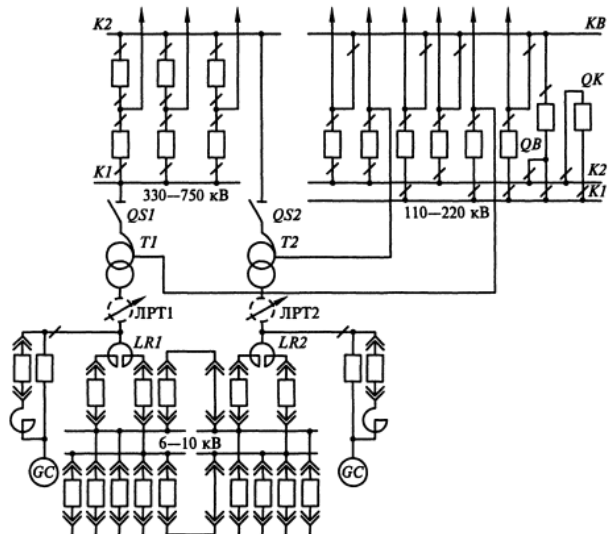
I. Схеми тупикових та відгалужувальних ПС



II. Схеми проходних ПС



III. Схеми вузлових ПС



Питання для самоперевірки

1. Схеми електричних з'єднань на стороні 35 кВ та вище.
2. Головні схеми ПС.
3. Схеми РП 10 кВ.
4. Вимоги до схем електроустановок.
5. Схеми головних з'єднань на стороні 6-10 кВ.
6. Схеми головних з'єднань на стороні 35 кВ та вище.

ТЕМА 12. РОЗПОДІЛЬНІ ПРИСТРОЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ

План

1. Загальні відомості про РП. Вимоги до РП.
2. Закриті РП
3. Відкриті РП
4. Комплектні РП та збірні камери

1. Загальні відомості про РП. Вимоги до РП.

Розподільний пристрій (РП) – це електроустановка, що призначена для приймання та розподілення електричної енергії, яка складається зі збірних шин, електричних апаратів та допоміжних пристроїв.

За розміщенням РП бувають:

- закриті (ЗРП) – розміщені всередині будівлі, використовують зазвичай для напруг 3-20 кВ;
- відкриті (ВРП) – розміщені зовні будівель, використовують зазвичай для напруг 35 кВ і вище.

Збірні РП (камери збірні) – РП, які збираються на місці встановлення з окремих вузлів.

Комплектні РП (КРП) – РП внутрішнього (КРПВ) або зовнішнього (КРПЗ) встановлення, які збираються в заводських умовах і поставляються в зібраному вигляді (комплекті).

До РП пред'являються такі вимоги:

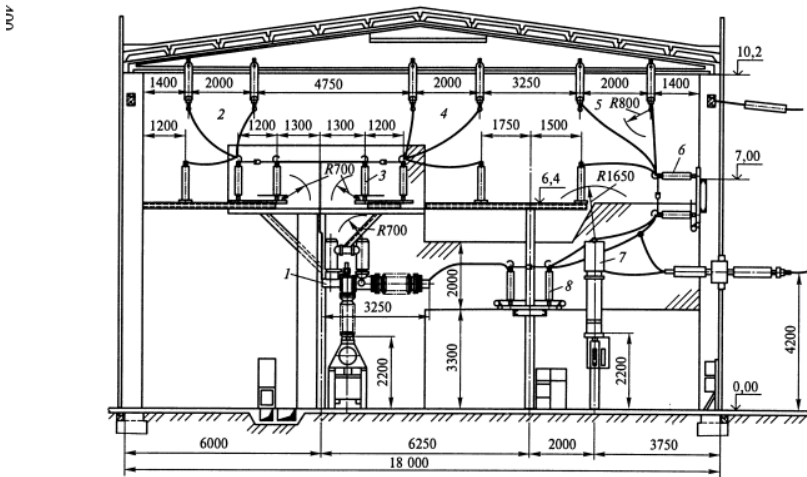
- зручність та безпека під час обслуговування (приклад – РП з висувними вимикачами);
- відокремлення неізольованих частин камерами та огороженнями;
- виконання вимог пожежної безпеки;
- економічність.

2. Закриті РП

Закриті РП (ЗРП) 6-10 кВ широко використовуються в міських електричних мережах, на електростанціях, а також для живлення промислових об'єктів.

В таких РП встановлюються маломасляні або безмасляні вимикачі незначних габаритів, що дозволяє розмістити все обладнання одного приєднання в одній комірці – збірній камері або комірці комплектного РП.

В особливих випадках (обмеження в площі, забруднена атмосфера, суворі кліматичні умови) використовуються закриті РП напругою 35-220 кВ.



На рис. 2 наведено генераторний розподільний пристрій 6-10 кВ з системою шин, що розділена на три секції.

- кращі умови для реконструкції;
 - кращі умови для спостереження за обладнанням.
- Недоліки ВРП:**
- гірші умови для обслуговування (під відкритим небом);
 - займають більшу площу;
 - апаратура ВРП піддається впливу атмосферних факторів.

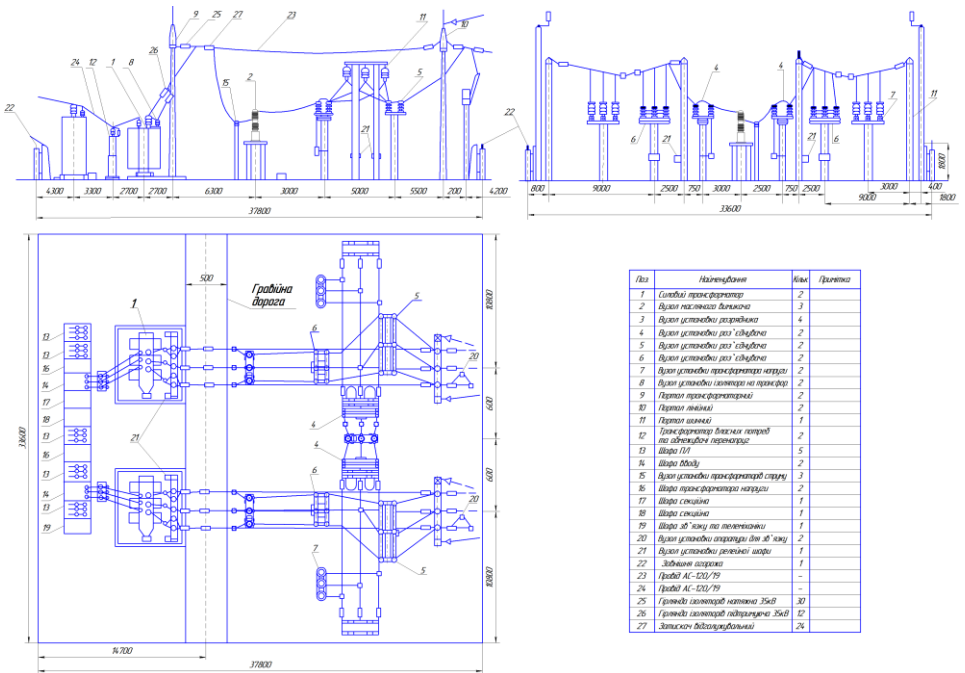


Рис. 3. Приклад ВРП 35 кВ ПС 35/10 кВ

4. Комплектні РП та збірні камери

Комплектні РП призначені для приймання і розподілення електроенергії в електроустановках напругою 6-10 кВ (рідше 35-500 кВ). Поставляються на місце монтажу в зібраному (комплектному) вигляді. Бувають двох видів:

- внутрішнього встановлення – КРП (призначені для використання в закритих РП);
- зовнішнього встановлення - КРПЗ (буква З - призначені для використання зовні приміщень).

Камери збірні (КЗ) мають те ж саме призначення, але, на відміну від КРП, поставляються на місце монтажу в розібраному вигляді.



Рис. 4. Загальний вигляд закритого КРП 10 кВ на основі комірків серії D-12Р виробництва компанії «Таврида Електрик»

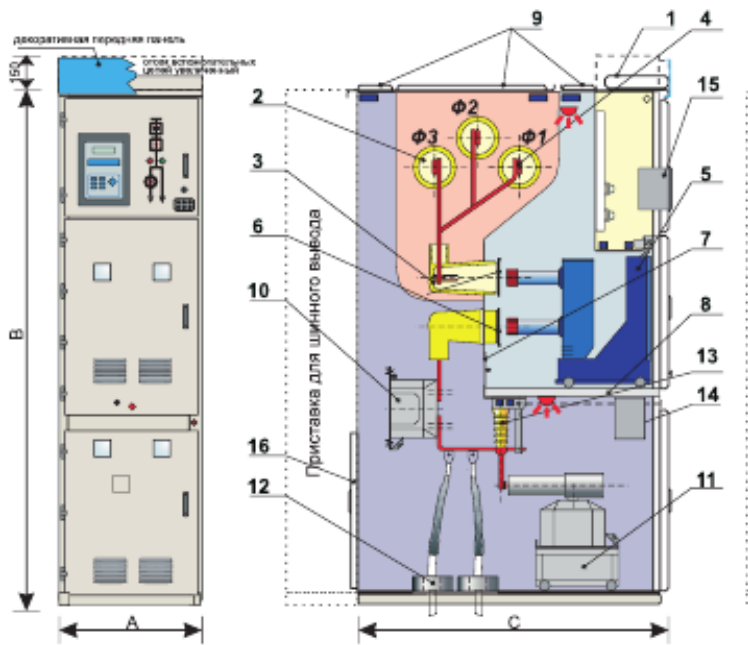


Рис. 5. Будова комірок КРП 10 кВ серії D-12Р виробництва компанії «Таврида Електрик»

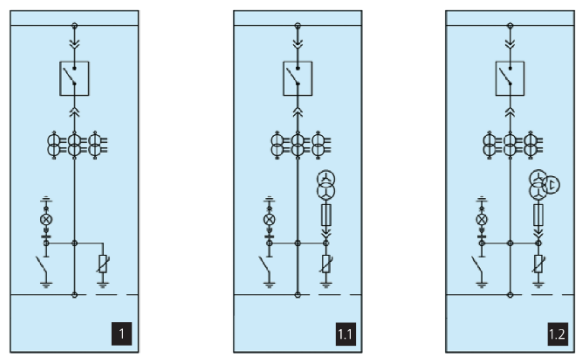


Рис. 6. Схеми головних кіл комірок КРП 10 кВ серії D-12Р виробництва компанії «Таврида Електрик»



Рис. 7. Камери збірні одностороннього обслуговування 10 кВ серії КСО 209 ЕК виробництва компанії "НТК Енерго-Тайм"

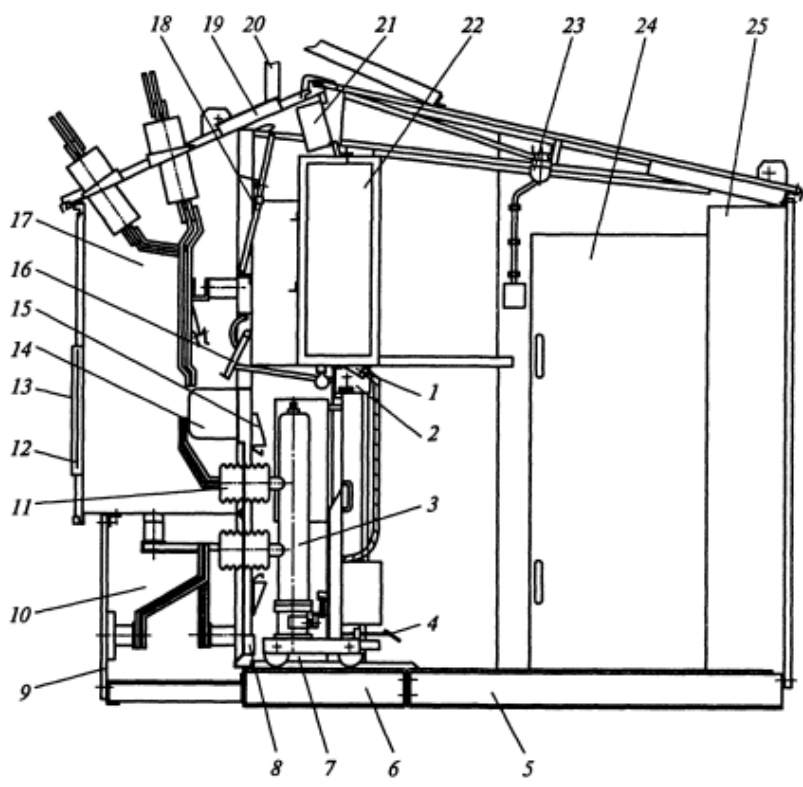


Рис. 8. Будова КРП зовнішнього встановлення 10 кВ типу К-59

Питання для самоперевірки

1. Розподільчі пристрої з однією системою збірних шин.
2. Розподільчі пристрої з двома системами збірних шин.
3. Спрощені схеми розподільчих пристроїв.
4. Вимоги до відкритих РП.
5. Конструкції ВРП з роз'єднувачами поворотного типу.
6. Конструкції ВРП з роз'єднувачами підвісного типу.
7. Призначення РП.
8. Класифікація РП.
9. Основні вимоги до РП.
10. Основні вимоги до закритих РП.
11. Типи ЗРП.
12. Конструкції ЗРП напругою 35-220 кВ.
13. Конструкції ЗРП напругою 6-10 кВ з однією системою збірних шин.
14. Розміщення РП на території електростанцій.
15. Розміщення РП на території підстанцій.

ТЕМА 13. УСТАНОВКИ ОПЕРАТИВНОГО ЗМІННОГО Й ВИПРЯМЛЕНОГО СТРУМУ

План

1. Споживачі електроенергії змінного й випрямленого оперативного струму
2. Джерела оперативного змінного струму
3. Установки випрямленого оперативного струму

1. Споживачі електроенергії змінного й випрямленого оперативного струму

Застосування постійного оперативного струму, що вимагає установки акумуляторних батарей, збільшує вартість спорудження, експлуатаційні витрати, викликає необхідність спорудження розгалуженої мережі постійного струму.

Впровадження в установках змінного й випрямленого оперативного струму дозволяє відмовитися від дорогих акумуляторних батарей і зменшити розгалуженість оперативних кіл.

Змінний оперативний струм застосовується на підстанціях з вищою напругою 35 – 220 кВ без вимикачів ВН. На підстанціях з оперативним постійним струмом змінний оперативний струм застосовується на панелях щитів власних потреб (в. п.), а також компресорних, насосних і інших допоміжних пристроїв.

Змінний оперативний струм застосовується на ТЕС і АЕС у системі в. п. 0,4 кВ, крім кіл керування автоматичних вимикачів на вводах робочого й резервного живлення, а також у схемах керування роз'єднувачами й на місцевих ЩУ.

Випрямлений оперативний струм застосовується на підстанціях 110 кВ із одним- двома вимикачами ВН і на підстанціях 35 кВ із вимикачами ВН. На ТЕС і АЕС випрямлений струм застосовується для керування автоматичними вимикачами вводів 0,4 кВ РУ в. п., віддалених від головного корпусу, для блокування роз'єднувачів, технологічної сигналізації на блокових, групових і резервних ЩУ.

До особливої групи споживачів оперативного змінного струму, які вимагають підвищеної надійності електропостачання, відносяться пристрої контролю й автоматичного регулювання енергоблоку, а також аварійний захист ядерного реактора на АЕС.

2. Джерела оперативного змінного струму

Джерелами живлення змінним оперативним струмом є трансформатори струму, напруги й в.п.

Для захисту від КЗ найбільш надійним джерелом оперативного струму є трансформатори струму, тому що при протіканні струму КЗ вторинний струм їх забезпечує надійне відключення вимикача. Трансформатор напруги в цьому випадку не може служити джерелом оперативного змінного струму, тому що при КЗ різко знижується напруга. Трансформатори напруги використовуються для живлення зарядних пристроїв і блоків живлення, для релейного захисту від однофазних замикань на землю в мережі з незаземленою нейтраллю.

Трансформатори струму й напруги використовуються як індивідуальні джерела оперативного струму для даного приєднання, не пов'язані з колами керування інших приєднань, що забезпечує їхній високу надійність, а в електроустановці зменшує довжину вторинних кіл.

На сьогодні випускаються релейна апаратура й приводи вимикачів, короткозамикачів, віддільників на оперативному змінному струмі для електроустановок 3 – 110 кВ. Найбільш широке застосування вони знаходять на підстанціях.

Іншим джерелом оперативного змінного струму є трансформатори в. п. У цьому випадку використовується силова мережа вторинної напруги в. п. (фазна напруга 220 В). Живлення оперативних кіл здійснюється централізовано, для групи або всіх приєднань даного об'єкта. Для забезпечення надійності в схемах живлення оперативним змінним струмом виконується резервування від різних джерел, що забезпечує збереження живлення при можливих аварійних режимах (рис. 1).

Оперативні шинки 4 одержують живлення через стабілізатори напруги 1 від двох секцій в. п. 220 В. Резервування живлення здійснюється автоматичним пристроєм 2.

Шинки управління ШУ й сигналізації ШС дублюються для підвищення надійності. Для відключення приводів установлений зарядний пристрій 5 з випрямлячами й конденсаторами.

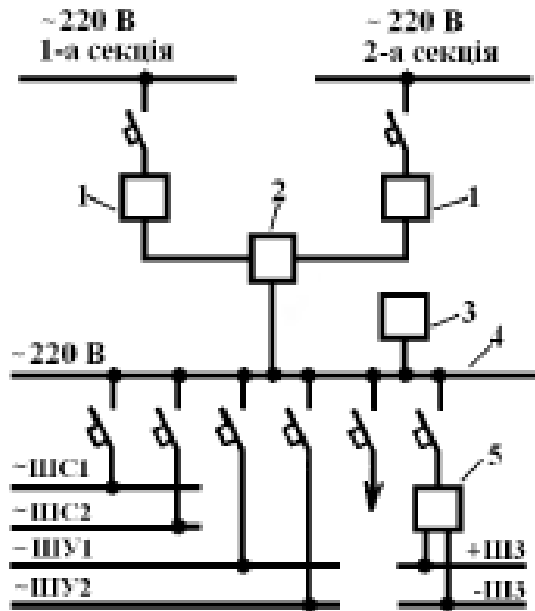


Рисунок 1 – Схема живлення мережі оперативного змінного струму

3. Установки випрямленого оперативного струму

Випрямлений оперативний струм дозволяє застосувати більш надійні схеми й апаратуру постійного струму й приводи з більш простою кінематикою.

Для одержання випрямленого напруги (струму) застосовують:

- силові випрямлячі для живлення електромагнітів включення приводів вимикачів;
- зарядні пристрої, запасена енергія яких служить для живлення різних апаратів навіть при зникненні напруги на об'єкті;
- блоки живлення, що включаються на трансформатори струму, напруги й в. п., для живлення вторинних кіл.

Блоки живлення широко застосовують у схемах релейного захисту.

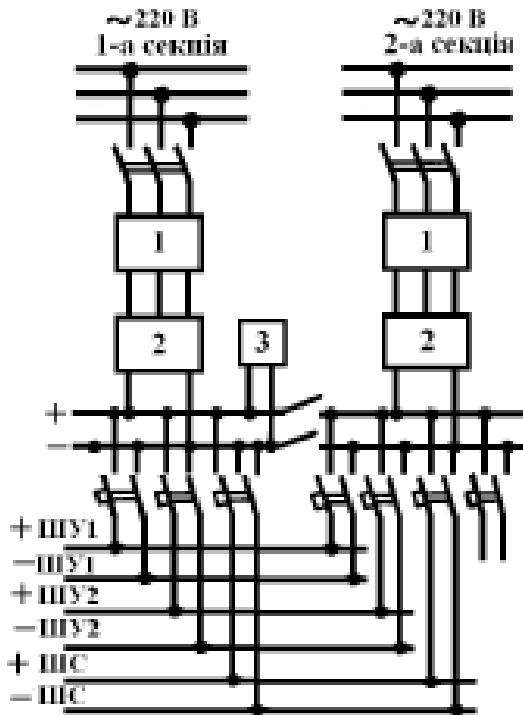


Рисунок 2 – Схема живлення випрямленим оперативним струмом:

1–стабілізатор напруги; 2 – блоки живлення; 3 – контроль ізоляції

На рисунку 2 показана схема живлення випрямленим оперативним струмом шин керування й сигналізації. Якщо випрямлений струм необхідний для керування електромагнітними приводами, то застосовується схема, аналогічна схемі (рис. 2), але замість блоків живлення встановлюються силові випрямлячі, у якості яких застосовуються напівпровідникові випрямлячі, з'єднані за трифазною мостовою схемою.

В електроустановках зі змінним оперативним струмом звичайно встановлюються вимикачі із пружинними приводами, для керування якими можуть використовуватися зарядні пристрої СГ. Принцип їхньої роботи полягає в тому, що в нормальному режимі роботи через випрямний пристрій заряджаються конденсатори (звичайно до 400 В), а в момент відключення або включення відповідний конденсатор розряджається на керуючий електромагніт. Ємність конденсатора С і напруга на його пластинах U підбираються так, щоб енергія, запасена в конденсаторі, $CU^2/2$ перевищувала енергію спрацьовування керуючого електромагніта; час першого імпульсу розряду повинен перевищувати час спрацьовування електромагніта. Для живлення електромагнітів відключення вимикачів із приводами типів ПС, ПЭ й для керування контакторами включення. Електромагніти включення в цьому випадку одержують живлення від трансформаторів в. п. через випрямні пристрої.

Комбіноване живлення оперативних кіл від блоків живлення, зарядних пристроїв і випрямлячів забезпечує високу надійність роботи схем релейного захисту, автоматики, керування, сигналізації й блокування.

На рисунку 3 показана схема централізованого живлення оперативних кіл із застосуванням перерахованих вище джерел випрямленої напруги. Кола релейного захисту й сигналізації 1 одержують живлення від двох блоків БПТ, приєднаних до трансформаторів струму на живильних лініях, і одного блоку БПН, приєднаного до трансформатора напруги збірних шин.

Дублювання блоків живлення забезпечує роботу релейного захисту при будь-яких ушкодженнях.

Кола живлення електромагнітів відключення 2 приєднуються до зарядного пристрою СГ. Кола електромагнітів включення 3, що споживають значний струм при включенні, приєднуються до силового випрямляча VS, що живиться від трансформатора в. п., тому що потужність трансформатора напруги недостатня для електромагнітів включення.

Надійність живлення кіл 2 і 3 забезпечується установкою двох зарядних і випрямних пристроїв, що приєднуються до різних трансформаторів напруги й власних потреб.

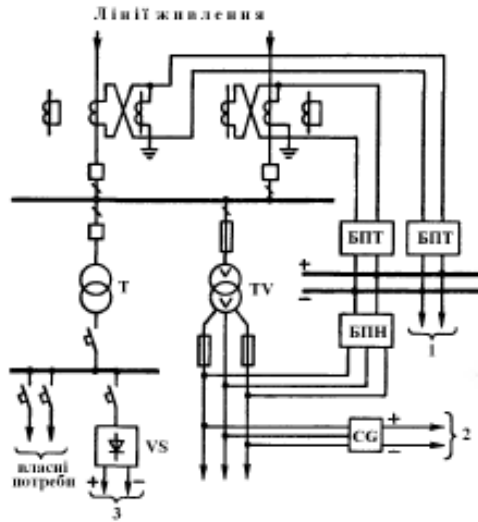


Рисунок 3 – Схема централізованого живлення оперативних кіл релейного захисту й сигналізації (1), кіл електромагнітів відключення (2) і включення (3)

Питання для самоперевірки

1. Джерела енергії постійного струму.
2. Джерела енергії змінного струму.

ТЕМА 14. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ

План

1. Принципи керування електроустановками. Автоматизовані системи керування технологічними процесами
2. Дистанційне керування комутаційними апаратами
3. Блокування роз'єднувачів
4. Прилади контролю та вимірів. Сигналізація. Щити управління

1. Принципи керування електроустановками. Автоматизовані системи керування технологічними процесами

Підвищення надійності роботи електричних станцій і підстанцій, підвищення якості електроенергії, покращення техніко-економічних показників роботи електростанцій, підвищення продуктивності праці на даний момент не можливо без упровадження пристроїв автоматики.

Пристрої автоматики можна поділити на дві групи:

1. пристрої станційної автоматики;
2. пристрої системної автоматики.

Основними пристроями автоматики, які запроваджені на електростанціях, є:

1. автоматика паливоприготування та паливоподачі;
2. автоматика приготування хімічної води;
3. автоматика ведення заданого режиму котла та турбіни;
4. автоматика пуску та зупинки агрегатів;
5. автоматична синхронізація генераторів;
6. автоматичне регулювання збудження синхронних машин;
7. автоматичне гасіння поля синхронних машин;
8. автоматичне увімкнення резерву;
9. автоматичне розподілення активного та реактивного навантаження між генераторами електростанції.

До системної автоматики відносяться:

1. автоматичне розподілення навантаження між електростанціями енергосистеми;
2. автоматичне регулювання частоти в системі ;
3. автоматичне регулювання напруги у вузлових точках системи;
4. автоматичне повторне включення (АПВ);
5. автоматичне розвантаження по частоті;
6. автоматичне включення резерву на підстанціях.

Завдання АСУ ТП (автоматизована система управління технологічними процесами):

1. контроль за ходом технологічного процесу;
2. стабілізація технологічних та електричних параметрів;
3. програмне управління (запуск та зупинка обладнання);
4. оптимізація режиму роботи;
5. захист від аварій;
6. оперативний зв'язок з верхнім рівнем управління;
7. ведення документації.

Основою АСУ ТП блоків є інформаційна система або інформаційний комплекс (ІК), який виконує функції централізованого контролю – збору, первинної обробки і відображення інформації про технологічні параметри процесу та про стан технологічного обладнання.

ІК (інформаційний комплекс) здійснює також сигналізацію стану параметрів технологічного процесу та реєстрацію параметрів технологічного процесу. В АСУ ТП блока проводиться розрахунок техніко-економічних показників за ходом технологічного процесу, готується інформація для вищих рівнів управління.

2. Дистанційне керування комутаційними апаратами

Засоби дистанційного управління комутаційними апаратами необхідні при проведенні оперативних переключень в нормальних режимах та при ліквідації аварійного стану.

Подача команди керування проводиться вручну оператором або від автоматичних пристроїв. Дія системи керування

супроводжується роботою пристроїв сигналізації. Дистанційне керування вимикачем проводиться кнопчними або поворотними ключами.

Недоліком кнопчних ключів є відсутність мнемоничності (по положенню кнопки неможливо судити про положення ключа) та трудність відображення їх положення на схемі щита керування. Ключі керування мають оперативні, сигнальні та аварійні контакти.

Оперативні контакти замикаються тільки на термін подачі команди. Ці контакти виконані з пружинним поверненням у вихідне положення.

Сигнальні контакти вмикаються у відповідні кола сигнальних пристроїв і мають два фіксованих положення: замкнуте та розімкнуте.

Аварійні контакти вводяться в коло сигналу аварійного відключення. Ці контакти на термін подачі команди на включення розмикаються, після чого повертаються у вихідне положення пружиною.

До систем дистанційного керування вимикачами пред'являються ряд вимог:

1) кола керування повинні допускати вимкнення вимикача як зі щита керування, так і за місцем його установки;

2) на щитку управління і в розподільній установці повинна бути передбачена сигналізація положення вимикача;

3) кола керування (увімкнення та вимкнення) повинна мати контрольні пристрої, що дають сигнал при розриві цих кіл;

4) керуючий імпульс повинен зніматися з виконавчого елемента після виконання команди, так як обмотки електромагнітів не передбачені для довгочасного обтікання струмом;

5) схема управління повинна передбачати блокування від "скачків", виключаючи можливість при коротких замиканнях багаторазових вмикань вимикача при одному командному імпульсі;

6) схема повинна передбачати можливість не тільки ручного керування, але і подачі відповідного імпульсу від пристроїв

релейного захисту та автоматики;

7) кількість жил контрольного кабелю, який з'єднує пристрої щитка керування і вимикача, повинна бути мінімальною.

При використанні соленоїдних чи електродвигунних приводів необхідно передбачити роздільне живлення силових кіл привода та кіл керування. Це дає можливість застосовувати незначні перерізи кіл керування та зменшити довжину кабелів силових кіл, шини живлення яких розташовані в розподільних установках.

Кола, як правило, розділяються проміжним контактором, котушка якого вмикається в коло керування, а його контакти – в силове коло приводу.

Проміжні контактори (КМ) полегшують гасіння електричної дуги при розриві силового кола.

Команди дистанційного керування подають вручну, як правило, при допомозі ключів керування.

Дистанційне керування вимикачами з електромагнітними приводами.

На рис. 1 зображена схема керування вимикачами з ключем керування ПМОВФ (перемикач малогабаритний оперативний з само поверненням рукоятки із оперативних положень з фіксацією).

Електромагніт вмикання виконує наступні функції: 1 - переміщує контактну систему вимикача; 2 - зводить пружини вмикання .

Враховуючи це, електромагніт вмикання повинен розвивати великі зусилля. Такі електромагніти споживають великий струм. Їх живлення здійснюється від джерела живлення через спеціальні шини живлення приводу (ШП).

Електромагніт вмикання призначений для звільнення защіпки привода. Після чого вимикач вмикається від дії пружини вмикання. Для такої операції від електромагніту великих зусиль не потрібно, тому він споживає невеликий струм і виконується компактним. Живиться електромагніт вмикання від шинок керування через контакти ключа або реле керування.

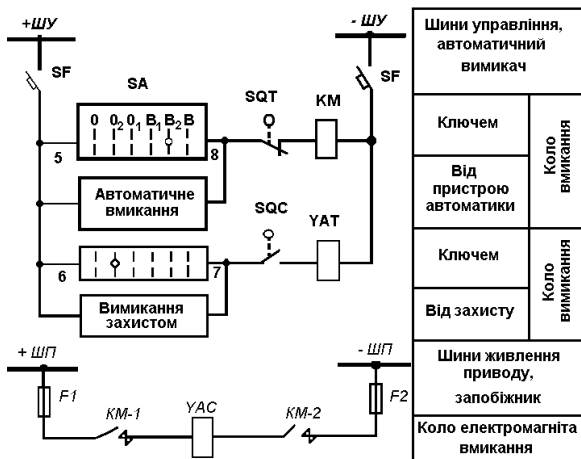


Рис. 1 - Схема управління вимикачем з електромагнітним приводом та ключем ПМОВФ: SF – автоматичний вимикач; SA – ключ керування; SQT – допоміжний замкнутий контакт вимикача; SQС – допоміжний розімкнутий контакт вимикача; КМ – проміжний контакт; YAT – електромагніт вимикання; YAC – електромагніт вмикання; КМ – 1; КМ – 2 – контактор

Робота схеми на вмикання

Команди на вмикання вимикача подаються ключем керування ПМОВФ. Причому подача команди здійснюється в два етапи: 1 - попередня команда, 2 - основна команда. З положення рукоятки “вимкнено” в положення “попередньо увімкнено” (це попередня команда) та з положення “попередньо увімкнено” в положення “увімкнено” (основна команда).

Виконання команди в два етапи знімає ймовірність помилкових дій персоналу.

Після подачі команди та звільнення рукоятки ключа, рукоятка під дією механізму повернення переходить в положення «увімкнено».

При подачі команди “увімкнено” створюється коло: + ШУ; контакти 9-12 ключа керування; замкнуті контакти вимикача 3.SQT; обмотки проміжного контактора 5. КМ; – ШУ.

По обмотці проміжного контактора 5.КМ протікає струм, в результаті чого контакти 8.КМ – 1 і 8.КМ – 2 замикають коло живлення електромагніту вмикання.

7 УАС і вимикач вмикається. Аналогічно проходить вмикання вимикача при дії пристроїв автоматики.

Робота схеми на вимикання

Команда на вимикання виконується при допомозі ключа також в два етапи: з положення “увімкнуто” в положення “попередньо вимкнуто” (попередня команда) та з положення “попередньо вимкнено” в положення “вимкнути” (основна команда).

Після команди “вимкнути” рукоятка ключа повертається в положення “вимкнуто”.

При подачі команди “вимкнути” створюється коло: + ШУ; контакти 10-11 ключа керування; допоміжний контакт вимикача 4SQС (який замкнувся при вмиканні вимикача); обмотка електромагніту вимикання 6.УАТ; - ШУ.

Осердя електромагніту вимикання УАТ втягується, звільнює зашіпку приводу і вимикач вмикається.

Функції допоміжних контактів SQТ і SQС

Обмотки електромагнітів вмикання та вимикання розраховані на короткочасне проходження струму. Короткочасність командного імпульсу забезпечується допоміжними контактами SQТ і SQС. Ці контакти введені в коло керування та зв'язані з валом приводу вимикача. Вони розмикають коло керування після вмикання (SQТ) або вимикання (SQС) вимикача, а також забезпечують безструмове розмикання контактів ключа керування або реле після виконання команди керування.

Ці контакти не розраховані на розрив струму обмоток електромагнітів вмикання та вимикання УАС і УАТ.

3. Блокування роз'єднувачів

На електричних станціях і підстанціях застосовують блокування безпеки та оперативні блокування. Блокування

безпеки попереджає обслуговуючий персонал при вході в камери РУ при наявності напруги. Двері чи сітчасті огорожі блокуються електричними замками, які допускають відкриття тільки при знятті напруги. Оперативне блокування служить для попередження невірних операцій роз'єднувачами, щоб виключити вимикання роз'єднувача під навантаженням.

Для цього роз'єднувачі блокуються з відповідними вимикачами.

Оперативне блокування буває:

- 1) механічне;
- 2) електричне.

Механічне блокування широко застосовують для робочих та заземлювальних ножів роз'єднувачів.

Привод роз'єднувача виконаний так, що виключається одночасне вмикання робочих та заземлювальних ножів.

Механічне блокування також широко застосовується для роз'єднувачів в колах, які приєднані до однієї системи шин ЗРП.

У цьому випадку блокування, здійснюється механічним зв'язком приводів вимикача і роз'єднувача, при якому роз'єднувач можна вимкнути тільки при вимкнутому вимикачі.

Принципова схема механічного замкового блокування роз'єднувачів з однією системою збірних шин (Рис. 6).

Кожний роз'єднувач і вимикач має свій запірний замок. Він складається із корпусу 3 і рухомого стержня 1. Стержень входить в стопорний отвір приводу 2 блокуючого апарата. На другому кінці рухомого стержня, який знаходиться в середині корпусу, є спеціальні виступи для переносного ключа 4.

Ключ може бути вставлений в замок або витягнутий з нього тільки в кінцевих положеннях приводу, коли фіксує стержень входить в передбачений для нього отвір.

Для уникнення помилок ключ і замок виконуються з певним секретом.

Робота схеми блокування

Нормально ключ знаходиться в замку вимикача. Витягти його можна тільки у вимкнутому положенні вимикача.

При витягненні ключа фіксує рухомий стержень замка

запирає привод вимикача у вимкнутому стані. Після цього витягнутим ключем відкривають замок лінійного роз'єднувача: 1) вставляють ключ в отвір корпуса 2) зачіплюють рухомий стержень; 3) витягують стержень поворотом ключа; 4) відключають лінійний роз'єднувач QS1; 5) після відключення роз'єднувача запирають замок в новому положенні; 6) ключ звільняють; 7) аналогічно проводять операції із шинним роз'єднувачем QS2.

Для вмикання електричного кола всі дії проводять в зворотньому порядку.

Механічне блокування застосовують в схемах з малою кількістю приєднань (до 10 приєднань).

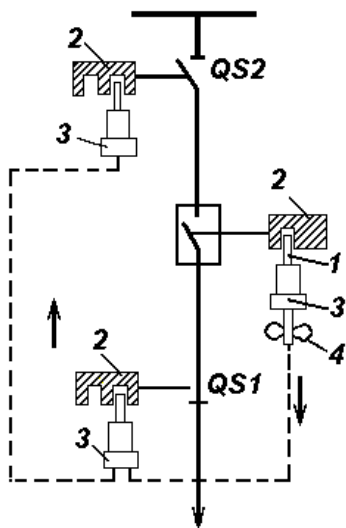


Рис. 6 - Принципова схема механічного замкового блокування

4. Прилади контролю та вимірів. Сигналізація. Щити управління

У колах генераторів, трансформаторів, ліній необхідно встановлювати такі контрольно – вимірювальні прилади і в такій

необхідній кількості, щоб забезпечити:

- 1) нормальне ведення режиму роботи електропристрою;
- 2) забезпечити контроль за станом основного обладнання.

Амперметри встановлюються у всіх електричних колах. У колах з рівномірним навантаженням встановлюються амперметри в одній фазі. В колах генераторів, повітряних ліній, в колах з нерівномірним навантаженням або чотири провідних мережах амперметри встановлюють у всіх фазах.

Для контролю якості електроенергії використовуються вольтметри і частотоміри. Ці прилади встановлюють на збірних шинах.

Для контролю за роботою генераторів щодо графіка та обліку розподілення потоків потужності з основних елементів електропристрою використовуються ватметри активної і реактивної потужності. Такі прилади встановлюються на генераторах, трансформаторах і лініях зв'язку.

На основних відгалуженнях власних потреб встановлюються ватметри активної потужності. Для обліку виробітку та розподілення електричної енергії використовуються лічильники активної та реактивної енергії.

Реєструючи ватметри встановлюють в колах генератора. На шинах станцій встановлюються реєструючі вольтметри і частотомір.

Для контролю ізоляції в системі з малими струмами замикання на землю на збірних шинах передбачається комплект із трьох вольтметрів.

Вище вказані прилади приєднуються до відповідних вимірювальних трансформаторів. При цьому застосовують роздільне живлення обмоток контрольно – вимірювальних приладів, релейного захисту і автоматики.

Сигналізація

Для полегшення роботи чергового персоналу та контролю стану обладнання на щитах керування (ЩК) електричних станцій встановлюються сигнальні пристрої. Ці пристрої використовують

для: 1) сигналізації положення
2) аварійної сигналізації; 3) сигналізації застереження; 4)
командної сигналізації.

Сигналізація положення показує увімкнутий чи вимкнутий стан комунікаційних апаратів: вимикачів, роз'єднувачів, відокремлювачів, автоматичних вимикачів. Частіше всього сигналізація положення виконується лампами різного кольору.

Для оперативних роз'єднувачів застосовують спеціальні сигнальні прилади типу ПС, які внесені в мнемонічну схему щита керування.

Для аварійної сигналізації використовують гудок, який сповіщає персонал про аварійне вимкнення вимикача.

Залежно від кількості вимикачів та призначення пристрою, схеми аварійної сигналізації виконуються з місцевим та центральним зняттям звукового сигналу. Сигнал, як правило, знімають вручну. Світовий аварійний сигнал вимикача, що вимкнувся, знімається ключем керування після запису всіх даних для внесення причин аварії.

Схеми з центральним зняттям звукового сигналу виконуються без повторностей і з повторністю дій.

Сигналізація застереження сповіщає персонал про ненормальні режими, які можуть призвести до аварії, якщо їх не ліквідувати. Для такої сигналізації використовують дзвінки або сирена тону, який відрізняється від аварійної сигналізації.

За індивідуальними світовими сигналами, що мають відповідні підписи, визначають вид та місце порушення нормального режиму. Схеми сигналізації застереження подібні до схем аварійних сигналізацій.

Деякі сигнали застереження виконуються з витримкою часу, для цього в індивідуальних колах такої сигналізації встановлюють реле часу. Витримка часу застосовується для сигналів перевантаження, захисту від замикання на землю і т.д.

Командна сигналізація забезпечує зв'язок між черговими головного щита керування та машинного залу для взаємної передачі основних розпоряджень.

На головному щиту та у кожного агрегату встановлюються

командоапарати, які мають звуковий сигнал, світові табло з підписами основних команд, кнопки для подачі та зйому сигналу.

Щити керування

Пристрої дистанційного керування і сигналізації, вимірювальні прилади, апарати релейного захисту, автоматики електростанцій та підстанцій розташовуються на щитах керування (ЩК) і диспетчерських пунктах.

На електричних станціях є місцеві та головні щити керування (ГЩК). На ГЩК розміщені прилади та пристрої керування і контролю за роботою генераторів, силових трансформаторів, трансформаторів власних потреб, ліній електропередачі. На ГЩК розташований розподільний щит постійного струму. Головний щит керування складається з окремих панелей та пультів. На ТЕС (теплові електричні станції) головний щит керування розташований поблизу машинного залу та РП.

Місцеві щити керування розподіляються на:

- 1) індивідуальні – для обслуги окремих електродвигунів;
- 2) агрегатні – для керування окремими агрегатами котлів, турбоагрегатів;
- 3) групові – для обслуги декількох агрегатів однакового призначення;
- 4) блочні – для контролю та керування різними агрегатами окремих технологічних блоків;
- 5) цехові – для керування обладнанням всього цеху.

Місцеві щити керування виконуються на таких же панелях, як і ГЩК.

Зв'язок між елементами вторинних електричних кіл виконуються за допомогою спеціальних проводів та кабелів. Вони називаються контрольними кабелями та проводами, які разом з приладами та апаратами складають схеми вторинних кіл.

Питання для самоперевірки

1. Обсяг вимірювань.
2. Вимірювальні прилади.
3. Призначення та види сигналізації.
4. Щити управління.
5. Види блокувань.
6. Механічне блокування.
7. Електромагнітне блокування.
8. Види керування.
9. Дистанційне керування високовольтними вимикачами з електромагнітним приводом.
10. Блокування від багатократного вмикання на к.з.
11. Дистанційне керування роз'єднувачами.

ТЕМА 15. СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ

План

1. Основні поняття про заземлюючі пристрої
2. Розподіл потенціалу і розтікання струму в землі від заземлювача

1. Основні поняття про заземлюючі пристрої

Існує три види заземлення:

- 1) захисне заземлення;
- 2) робоче заземлення;
- 3) грозозахисне заземлення.

1. Усі металеві частини електропристроїв, що нормально не знаходяться під напругою, але можуть опинитися під напругою із-за пошкодження ізоляції, повинні надійно з'єднуватись з землею. Такий вид заземлення називається захисним. Ціль захисного заземлення – це знизити до безпечної величини напругу відносно землі на металевих частинах електричного обладнання, які нормально не знаходяться під напругою, але опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції.

Застосування захисного заземлення в пристроях напругою до 1000 В обумовлене режимом нейтралі. Якщо нейтраль заземлена, то захисне заземлення замінюється зануленням.

У пристроях напругою вище 1000 В захисне заземлення виконується в усіх випадках незалежно від режиму нейтралі чи виду приміщення.

2. Заземлення, що призначене для створення нормальних умов роботи апарата або електропристрою, називається робочим заземленням. До робочого заземлення відноситься заземлення нейтралей трансформаторів, генераторів, дугогасильних котушок.

Без робочого заземлення апарат не може виконувати своїх функцій або порушується режим роботи електропристрою.

3. Для захисту обладнання від пошкодження ударів блискавки застосовується грозозахист при допомозі:

- розрядників;
- іскрових проміжків;
- стержневих та тросових блискавковідводів, які приєднуються до заземлювачів.

Таке заземлення називається грозозахист. Для виконання заземлення використовують природні та штучні заземлювачі.

До природних заземлювачів відносяться металеві та залізобетонні конструкції споруд, свинцеві оболонки кабелів, заземлювачі опор повітряних ліній. Ці заземлювачі повинні мати зв'язок з магістралями не менше, ніж двома провідниками в різних точках. В якості штучних заземлювачів застосовують пруткову круглу сталь діаметром не менше 10 мм (неоцинкована) та 6 мм (оцинкована), листову сталь товщиною не менше 4 мм та перерізом не менше 48 мм². Розміщення штучних заземлювачів проводиться таким чином, щоб досягти рівномірного розподілу електричного потенціалу на території, яка зайнята електрообладнанням.

2. Розподіл потенціалу і розтікання струму в землі від заземлювача

Заземлюючий пристрій складається з заземлювачів (металевого стержня, проводу) і заземлюючих провідників. Заземлювач безпосередньо стикається з ґрунтом, а заземлюючі провідники з'єднують з заземлювачами ті елементи електричних установок, що заземлюються. Найчастіше використовують контур заземлення, який складається з кількох заземлювачів, з'єднаних між собою проводом.

Основною характеристикою контуру заземлення є опір розтіканню струму r_3 , який визначає опір ґрунту в об'ємі між заземлювачем і поверхнею нульового потенціалу:

$$r_3 = \frac{U_3}{I_3},$$

де U_3 - напруга на заземлювачі відносно землі з нульовим

потенціалом при проходженні струму розтікання I_3 .

Знехтувавши опором заземлювача, можна вважати, що повний опір контуру заземлення дорівнює опору розтіканню струму.

На рис.1 дана характеристика заземлення на прикладі розтікання струму в землі від одного заземлювача. Якщо через заземлення проходить струм, то між будь-якими двома точками, він створює спад напруги $U = IR$, де R - опір ділянки між взятими точками. Якщо провідність землі в усіх напрямках однакова, то й струм розтікання в усі боки від заземлювача буде однаковим. Щільність струму в землі при віддаленні від заземлювача зменшується, оскільки сферичні поверхні, по яких проходить струм, весь час збільшуються. Відповідно й потенціали відповідних точок на поверхні землі також зменшуються. Найвищий потенціал спостерігається в точці, що відповідає заземлювачу. З віддаленням від нього потенціал різко зменшується і на відстані 20 м практично дорівнює нулю. Якщо людина, що стоїть на землі, перебуває під потенціалом $\varphi(I)$, то, дотикаючись рукою до елементів електроустановки з потенціалом φ_3 , вона потрапить під напругу, яка дорівнює різниці цих потенціалів. Ця напруга називається напругою дотику (U_d). При наближенні до заземленого елемента обладнання, що перебуває під напругою, ноги людини будуть перебувати під різними потенціалами φ_1 і $\varphi_2(II)$. Різниця цих потенціалів називається кроковою напругою ($U_{кр}$). Вона буде тим більшою, чим ближче до заземлення знаходиться людина і чим більший її крок. Вважають, що в середньому крок дорівнює 0,8 м. Таку ж відстань беруть і при визначенні напруги дотику.

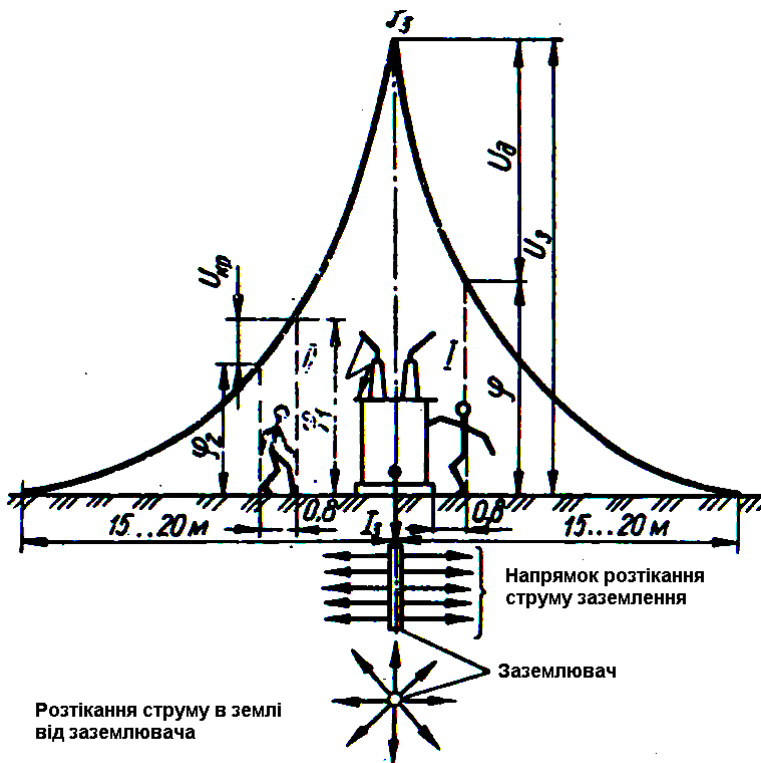


Рис.1 - Характеристика заземлення

У мережах з глухим заземленням нейтралі здійснюють занулення, а в мережах з ізолюваною нейтралю – заземлення. В чотирьох провідних мережах трифазного струму використовують глухе заземлення нейтралі.

Для установок напругою понад 1000 В з ізолюваною нейтралю, для яких напруга на заземлювачі не повинна перевищувати 250 В, опір заземлення (Ом) визначають з нерівності

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3}.$$

Якщо заземлюючий пристрій одночасно використовують і для електроустановок напругою менше 1000 В, то

$$R_3 \leq 125 / I_3.$$

За розрахунковий струм замикання на землю I_3 беруть найбільший можливий струм через заземлення. В установках з незаземленою нейтралю беруть ємнісний струм однополюсного замикання на землю.

У системі електропередачі з використанням землі як фазового проводу напруга на заземленні не повинна перевищувати 50 В. Опір заземлення в цій системі визначається за нерівністю

$$R_3 \leq 50 / I_{p \max},$$

де $I_{p \max}$ - максимальний робочий струм заземлення, А.

В електроустановках напругою від 110 до 750 кВ заземлюючий пристрій повинен мати опір не більше 0,5 Ом. При питомому опорі «землі» $\rho > 500$ Ом·м допускається збільшення опору заземлення залежно від ρ .

Опір заземлюючих пристроїв, до яких приєднано нейтралі генераторів і трансформаторів, повинен бути не більше 2 Ом в установках напругою 660/380 В, 4 Ом для електроустановок 380/220 В і 8 Ом для електроустановок 220/127 В.

При цьому штучне заземлення, до якого приєднують нейтраль генераторів і трансформаторів, повинно мати опір не більше: 15 Ом для електроустановок 660/380 В, 30 Ом для електроустановок 380,220 В і 60 Ом для електроустановок 220/127 В, якщо не вимагається меншого опору за умовами грозозахисту.

Якщо питомий опір землі $\rho > 100$ Ом·м, то допускається збільшення опорів заземлюючих пристроїв в $\rho/100$ разів (але не

більше, ніж в десять разів). Опір заземлення в електроустановках з ізолюваною нейтралю при напрузі до 1000 В не повинен перевищувати 10 Ом.

При розрахунку заземлення визначають опір розтіканню струму, вибирають тип заземлювача, схему контуру заземлення, його конструктивне виконання. Напругу на заземлювачі відносно землі для різних систем електропостачання вибирають різну. Заземлювачі бувають штучні і природні.

Кожний елемент установки, який заземлюється, приєднують до заземлення або до заземлюючої магістралі окремим провідником. Заземлюючими провідниками при відкритій прокладці можуть бути голі мідні провідники перерізом не менше 4 мм² або алюмінієві перерізом не менше 6 мм². Для ізолюваних провідників переріз повинен становити не менше 1,5 мм² для мідних і 2,5 мм² – для алюмінієвих провідів.

Питання для самоперевірки

1. Характеристики ґрунту.
2. Нормування заземлювальних пристроїв.
3. Розрахунок заземлювальних пристроїв.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Козлов В. Д. Електрична частина станцій та підстанцій аеропортів : підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова. – К. : НАУ, 2018. – 312 с.

2. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: О.В. Остапчук, П.Л. Денисюк, Ю.П. Матєєнко/КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 4,62 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 183 с.

3. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Понижуюча підстанція 110/10 кВ» /Воропай В. Г., Гаража В. М., Перепечений О.Т. 2002. – 46 с.

4. Електричні станції і підстанції [текст]: конспект лекцій для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми навчання / уклад. Євсюк М.М. – Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2018. – 210 с.

5. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє / за ред. І. Плачкова. – Книга 5. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5>

6. Текст лекцій з курсу “Електричні станції та підстанції” для студентів 3, 4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання спеціальностей 6.09 06 03 – “Електротехнічні системи електроспоживання” та 6.05 07 01 “Електротехніка та електротехнології” Харків – ХНАМГ – 2007. Авт.: В.І. Романченко, О.М. Довгалюк, Д.М. Калюжний, Т.В. Блощенко, І.Г. Натарова

Навчальне видання

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ТА ПІДСТАНЦІЇ

Конспект лекцій
Частина 2

САВЧЕНКО Олександр Анатолійович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.
Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

