

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії
та енергетики
Кафедра електрифікації,
автоматизації виробництва
та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

КРАМАРЕВ АНДРІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК - 665.9

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Дослідження однофазних замикань на землю в мережах 10-35 кВ»

спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Подається на здобуття освітнього ступеня *магістр*.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. В. Крамарев.

Керівник роботи
Савченко Л. Г.
к.і.н., доцент

Житомир - 2020

АНОТАЦІЯ

Крамарев А. В. Дослідження однофазних замикань на землю в мережах 10-35 кВ.

Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" Житомирський національний агроекологічний університет, Житомир, 2020.

Ключові слова: МЕРЕЖІ, ОДНОФАЗНІ ЗАМИКАННЯ, РЕЖИМ РОБОТИ.

В кваліфікаційній роботі приведені Дослідження однофазних замикань на землю в мережах 10-35 кВ. Метою роботи є підвищення надійності розподільних мереж напруги 10-35 кВ в системах електропостачання на основі досліджень, аналізу та розробки теоретично та експериментально підтверджених рекомендацій щодо вибору режиму роботи нейтралі.

В роботі використовувалися наступні методи досліджень: під час виконання теоретичних досліджень різних режимів роботи нейтралей електричних мереж – класичні методи аналізу процесів в електричних колах.

ANNOTATION

Kramarev A.V. Investigation of single-phase earth faults in 10-35 kV networks. Qualification work on the rights of the manuscript. Qualifying work for a master's degree in specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, 2020.

Keywords: NETWORKS, SINGLE-PHASE CIRCUITS, OPERATING MODE.

The qualification work presents Studies of single-phase earth faults in 10-35 kV networks. The aim of the work is to increase the reliability of 10-35 kV distribution networks in power supply systems on the basis of research, analysis and development of theoretically and experimentally validated recommendations for the choice of neutral mode.

The following research methods were used in the work: during the performance of theoretical researches of different modes of operation of neutrals of electric networks.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ З МАЛИМИ СТРУМАМИ	
1.1 Аналіз відношення між струмом і напругою при замиканні на землю..	6
1.2 Розрахунок ємнісного струму замикання на землю лінії передачі довжиною 1 км.....	12
1.3 Змінне однофазне замикання на землю.....	16
Висновки до першого розділу.....	19
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНОГО СТРУМУ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ	
2.1. Аналіз основних співвідношень при точній компенсації.....	21
2.2 Розбалансування компенсуючих (дугогасних) пристроїв.....	23
Висновки до другого розділу.....	22
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ, АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ.....	
3.1 Розрахунок ємнісного струму замикання на землю кабельної мережі через перехідні опори $R_d = 70 \text{ Ом}$ і $R_d = 0$	27
3.2 Розрахунок ємнісного струму на початку пошкодженої кабельної лінії.....	30
3.3 Визначення опору дугогасильного реактора.....	31
3.4 Негативні наслідки однофазних замикань на землю в електричних мережах.....	33
Висновки до третього розділу.....	35
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37
ДОДАТКИ.....	40

ВСТУП

Актуальність наукової роботи. Досліджено і проаналізовано характерні причини і наслідки роботи систем електропостачання в аварійних режимів роботи. Було виявлено що найбільше аварійних ситуацій створювалось в електричних мережах напругою 10–35 кВ за рахунок однофазних замикань на землю і супроводжувалися виникненням перенапруг і кидків ємнісних струмів. Рівень прояву цих ефектів коливався в широких межах залежав від слідуєчих факторів: віддаленості місць замикань на землю, від джерела живлення, довжини й завантаження мережі, режиму роботи нейтралі, початкових умов комутації, релейного захисту, тощо [1, 2, 4, 7, 9].

Аналізи досліджень показали що основним фактором, що визначає небезпеку виникнення й розвитку однофазних замикань в системах електропостачання, – спосіб заземлення нейтралі. Тому дослідження, аналіз та оцінка перспектив та вироблення рекомендацій щодо застосування різних режимів роботи нейтралей в розподільних мережах систем електропостачання напругою 10-35 кВ є актуальним питанням.

Мета і завдання наукової роботи. Метою роботи є підвищення надійності розподільних мереж напруги 10-35 кВ в системах електропостачання на основі досліджень, аналізу та розробки теоретично та експериментально підтверджених рекомендацій щодо вибору режиму роботи нейтралі.

Для досягнення поставленої мети **необхідно вирішити такі завдання:**

- провести дослідження, аналіз та аналітичний огляд всесвітнього досвіду режиму роботи нейтралі в розподільних мереж напруги 10-35 кВ в системах електропостачання;
- виконати теоретичні дослідження, аналіз та розрахунки на прикладі розподільної мережі 10 кВ;
- провести теоретичний аналіз різних режимів роботи нейтралі мережі, виявити їх переваги та недоліки;

- на основі проведеного аналізу розробити рекомендації щодо вибору режиму роботи нейтралі в розподільних мережах напругою 10-35 кВ.

Об'єкт дослідження: розподільні мережі напругою 10-35 кВ з різними режимами роботи нейтралі.

Предмет дослідження: електричні процеси в розподільних мережах напруги 10-35 кВ з різними режимами роботи нейтралі в системах електропостачання.

Методи досліджень. В роботі планується використовувати наступні методи досліджень: під час виконання теоретичних досліджень різних режимів роботи нейтралей електричних мереж – класичні методи аналізу процесів в електричних колах; при виконанні експериментальних досліджень квазіфізичної моделі розподільної мережі 10 кВ – методи теорії подібності та моделювання.

Перелік публікацій в збірниках ЖНАЕУ

1. 70. Т2. Крамарев А. В., Савченко Л. Г. Прядко В. А. Дослідження однофазних замикань на землю в мережах 10-35 кВ.

Наукові читання–5-6 березня 2020 р. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. 218 с.

2. Крамарев А. В., Оцінювання стану повітряних ліній 10- 0,4 кВ та оптимізація ремонтно-відновлювальних робіт

IV Міжнародна науково-практична конференція «Біоенергетичні системи»

28–29 травня 2020 року Поліський національний університет. Матеріали. Частина 2. Збірник.

3. Крамарев А. В., Боклан О. О., Прядко В. А. Дослідження та аналіз систем систем симетрування в мережах електропостачання.

Дослідження та аналіз схеми розподілу електроенергії для розвитку електричних мереж.

Студенські читання 2020 – 2020: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студенські читання 2020».

26 жовтня 2020 р. Житомир: ПНУ, 2020. – 400 с.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ З МАЛИМИ СТРУМАМИ

1.1 Аналіз відношення між струмом і напругою при замиканні на землю

Аналіз досліджень показує, що сила струму замикання на землю в системі електропостачання залежить від опору заземлюючих пристроїв, увімкнених в нейтраль генераторів, трансформаторів, від ємності мережі.

Якщо нейтраль ізольована то струм однофазного замикання на землю дорівнював би нулю, при умові, що елементи електричної системи не мали ємності відносно землі [1, 4].

На практиці обмотки машин і апаратів, мережі систем електропостачання, завжди мають розподілену ємність як між фазами, так і між кожною фазою і землею. Такі ємності сприяють виникненню додаткових струмів, які при нормальному режимі роботи додаються до струмів навантаження, замикаючись між фазами, а при однофазних замиканнях на землю проходять і по землі.

При розрахунках потрібно враховувати тільки ємності між фазами і землею (c_A, c_B, c_C), тому що струми замикання на землю проходять тільки через ці ємності.

Коли відбувається замикання однієї із фаз, наприклад C , через опір R струми, які протікають в землю від непошкоджених фаз через ємності c_A і c_B , замкнуться на фазу C по опору R паралельно з ємністю c_C (рис. 1.1 додаток А). При замиканні через металеві конструкції заземлення ($R=0$) ємність c_C являється зашунтованою, і струм по ній проходити не буде [3].

Не зважаючи на величини опору R сума ємнісних струмів однофазного замикання на землю на початку лінії (якщо знехтувати ємностями генеруючого джерела) дорівнює нулю; у кінці лінії (якщо замикання виникло не на самому кінці лінії) вона також дорівнює нулю. При цьому сума ємнісних струмів зростає по мірі наближення від початку (кінця) лінії до місця пошкодження.

Процес однофазного замикання на землю можна розглядати при слідуючих припущеннях, які значно спрощують висновки і разом з тим мало впливають на точність кінцевих результатів [4]:

1. Падіннями напруги у електричних мережах і обмотках машин від нормального навантаження, а також від струмів замикання на землю нехтуємо
2. Система електрорушійних сил генеруючих джерел симетрична і тому не має вищих гармонійних.
3. Провідності витоків не враховуються.

Перше припущення дозволяє вважати величину струму замикання незалежною від місця замикання. Крім того, це дає можливість замінювати одною зосередженою ємністю розподілені ємності окремих частин мережі чи всієї мережі.

Така заміна, очевидно, допустима для кожного елемента розглянутої системи, в якому визначаються величини струмів тільки по кінцях, але не в проміжних точках елемента.

Далі приведених висновках буде розглядається стійке однофазне замикання на землю ($R = \text{const}$).

На рис. 1.1. в додатку А, розглядається схема однофазного замикання на землю через перехідний опір R в мережі, яка живиться від генеруючого джерела з нейтраллю, заземленої через повний опір Z_0 (при наявності кількох заземлюючих пристроїв Z_0 — їх сумарний опір при паралельному з'єднанні).

Розподілені фазні ємності всіх електричних з'єднаних ліній, трансформаторів і машин (включаючи і живлячого генератора) замінені зосередженими ємностями c_A, c_B, c_C .

Струм замикання на землю у місці пошкодження I_3 може бути визначеним на основі теореми про еквівалентний генератор (Гельмгольца—Тевенена). Ця теорема дозволить більш наглядно показати незалежність струму I_3 від місця включення ємності в системі, а також вплив числа замкнутих витків обмотки машини чи приладу на струм I_3 .

У розглянутому випадку напруга між точкою замикання з і землею при відсутності пошкодження рівно нормальній напрузі даної фази U_ϕ . Еквівалентний опір системи, з врахуванням R , складає

$$\frac{Z_0}{j\omega(C_A+C_B+C_C)Z_0}$$

При визначенні струму пошкодження I_3 потрібно мати на увазі, що позитивне направлення цього струму прямо протилежне позитивному напрямку U_ϕ (рис. 1). З цього випливає, струм пошкодження рівний

$$I_3 = \frac{-\dot{U}_\phi}{R + \frac{Z_0}{j\omega(C_A+C_B+C_C)Z_0+1}} = \frac{-\dot{U}_\phi[j\omega(C_A+C_B+C_C)Z_0+1]}{R[j\omega(C_A+C_B+C_C)+1]+Z_0}$$

Враховуючи, що система симетрична ($c_A = c_B = c_C = c$), знаходимо

$$I_c = \frac{-\dot{U}_\phi(3j\omega c + \frac{1}{Z_0})}{R(pj\omega c + \frac{1}{Z_0})+1} \quad (1.1)$$

Струм I_3 складається із двох складових: струму, який замикається через ємності фаз

$$I_c = \frac{-\dot{U}_\phi 3j\omega c}{R(pj\omega c + \frac{1}{Z_0})+1},$$

і струму в нейтралі

$$I_{Z_0} = \frac{-\dot{U}_\phi}{Z_0[R(3j\omega c + \frac{1}{Z_0})+1]}$$

Зміщення напруги нейтралі системи U_0 , викликане замиканням на землю, визначаються як падіння напруги в опорі Z_0 від струму I_{Z_0}

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_\phi}{R(3j\omega c + \frac{1}{Z_0})+1} \quad (1.2)$$

Аналогічні рівняння для I_3 і U_0 утворюються і у випадку замикання на землю не в мережі, а в обмотці трансформатора чи машини, з'єднаної в зірку, при відносному числі витків між нейтраллю і точкою пошкодження z , рівному b (рис. 1.2, *a*, додаток А). Однак оскільки напруга в місці пошкодження до його виникнення була рівною bU_ϕ то в цьому випадку у рівнянні (1,1) і (1,2) замість напруги U_ϕ необхідно підставити понижену величину bU_ϕ (тут $0 < b \leq 1$). Напруга U_0 і струм I_3 прямопропорційні числу замкнутих витків обмотки одної із фаз. Вони змінюються від нуля при замиканні у самій нейтралі до максимальної величини при замиканні на виводі обмотки.

При замиканні в обмотці, з'єднаної в трикутник (рис.1.2, *б*) в рівнянні для I_3 і U_0 вийде напруга $b\dot{U}_\phi$, де b — комплексна величина. Вона визначається по векторній діаграмі (рис. 2, *б*) наступним чином. Позначимо відносне число витків між одним із кінців пошкодженої фази обмотки і місцем замикання (наприклад, число витків на ділянці Cz) через b' .

На векторі напруги BC (рис. 1.2, *в*) відкладаємо від точки C , відрізок, відносна довжина якого рівна $\frac{Cz}{CB} = b'$, і з'єднанням точку z з центром діаграми. Комплексний множник b визначається як відношення векторів $b = \frac{Oz}{OC} e^{j\beta}$. Очевидно, в якості \dot{U}_ϕ в рівнянні для I_3 і U_0 слід при цьому підставляти то напругу фази, від кінця вектора якого на діаграмі (рис. 2, *в*) був відкладений відрізок b' (в розглянутому прикладі-це буде напруга фази C).

В загальному випадку при замиканні на землю в симетричній системі, будь-якої конфігурації напруга зміщення нейтралі і загальний струм замикання на землю можуть бути визначені за формулами:

$$\dot{U}_0 = \frac{-b\dot{U}_\phi}{R\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right) + 1} \quad (1.3)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_c + \dot{I}_{Z_0} = \frac{-b\dot{U}_\phi\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right)}{R\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right) + 1} \quad (1.4)$$

При пошкодженні на лінії коефіцієнт $b = 1$, а при замиканні в будь-якій обмотці в залежності від схеми з'єднання він дорівнює дійсній чи комплексній величині, причому $b \leq 1$. Що стосується ємності c , до неї входять ємності всіх електричних з'єднань елементів даної системи.

Як витікає із цього розгляду, потужності генераторів не створюють ніякого впливу на струм I_3 .

При виникненні однофазного замикання на землю міжфазні напруги системи залишаються такими ж, як і при нормальному режимі, а напруга фаз відносно землі змінюється на величину U_0 :

$$\dot{U}_{A-3} = \dot{U}_A + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_{B-3} = \dot{U}_B + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_{C-3} = \dot{U}_C + \dot{U}_0;$$

Кут зміщення між напругами фаз і нейтралі залежить від відношення параметрів R , c і Z_0 . Із рівнянь (1.3) і (1.4) видно, що ємнісний струм I_C завжди випереджає напругу U_0 на 90° , а струм у нейтралі I_{Z_0} відстає на кут, який залежить від співвідношення індуктивного і активного опорів в нейтралі.

У системі з ізолюваною нейтраллю ($Z_0 = \infty$) напруга і струм замикання на землю рівні:

$$\dot{U}_0 = \frac{-b\dot{U}_\phi}{3Rj\omega c + 1} \quad (1.5)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{-3b\dot{U}_\phi j\omega c}{3Rj\omega c + 1}; \quad (1.6)$$

При повному металевому замиканні ($b = 1$; $R = 0$) напруга U_0 не залежить від наявності заземлення нейтралі:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{0n} = -\dot{U}_\phi$$

а струм I_3 складається із двох незалежних висячих одна від другої, складових: ємнісного струму

$$I_c = -3\dot{U}_\phi j\omega c \quad (1.7)$$

і струму в нейтралі

$$i_{Z_0} = -\frac{\dot{U}_\phi}{Z_0}. \quad (1.8)$$

В наслідок цього,

$$I_{3.n} = -\dot{U}_\phi \left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right). \quad (1.9)$$

Для ілюстрації виведених співвідношень розглянемо векторні діаграми (рис.1.3, додаток А), побудовані для випадку замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю ($Z_0 = \infty$; $b = 1$).

На рис.1.3, а показано утворення напруги нейтралі і фази відносно землі, а також струм в місці пошкодження I_3 . На рис.1.3, б відкладені фазні струми, які дають в сумі I_3 . Із першої діаграми видно, що напруга пошкодженої фази відносно землі \dot{U}_{C-3} складається із двох частин: напруги по відношенню до нейтралі \dot{U}_C і напруги нейтралі відносно землі

$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{U}_C}{3Rj\omega c + 1}.$$

Очевидно, \dot{U}_0 випереджує \dot{U}_{C-3} на 90° . При зміні R кінець вектора — \dot{U}_0 (тобто напруга землі по відношенню до нейтралі) переміщується по дузі кола, побудованій на \dot{U}_C , як на діаметрі. При $R = 0$ вектор — \dot{U}_0 співпадає з \dot{U}_C , а з збільшенням R — відстає від \dot{U}_C на кут, у межах (при $R \rightarrow \infty$) рівний 90° . Вектори напруги непошкоджених фаз відносно землі \dot{U}_{A-3} і \dot{U}_{B-3} представляють собою суми векторів відповідних напруг \dot{U}_A чи \dot{U}_B і напруги \dot{U}_0 .

Як видно із рис. 1.3, б, струм I_3 складається із трьох ємнісних струмів, створених напругами \dot{U}_{A-3} , \dot{U}_{B-3} і \dot{U}_{C-3} . Повний струм металевого замикання на землю $I_{3.n}$ і його складові I_c і I_{z0} відносяться до числа основних параметрів системи.

Ємнісний струм I_c може бути визначений на основі безпосередньої зміни сумарної ємності системи c чи наближено розрахунковим шляхом .

Згідно рівнянь (1.3), (1.4), (1.8) і (1.9) відносно зменшення напруги і струму замикання на землю при пошкодженні в обмотці якої-небудь машини чи апарату ($b < 1$) чи під впливом перехідного опору ($R > 0$) рівний

$$\beta = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_{0n}} = \frac{i_3}{I_{3.n}} = \frac{b}{R(3j\omega c + \frac{1}{Z_0})}$$

Для обліку такого зменшення при проектуванні вводиться розрахунковий коефіцієнт повноти замикання на землю

$$\beta_p = \frac{U_{0p}}{U_{0n}} = \frac{I_{3.p}}{I_{3.n}}. \quad (1.10)$$

(чи обернена йому величина, яка називається *коефіцієнтом чутливості*).

Тут U_{0p} і $I_{3.p}$ — розрахункові найменші величини напруги і струму при $c = \text{const}$.

1.2 Розрахунок ємнісного струму замикання на землю лінії передачі довжиною 1 км

Для повітряних ліній середня ємність фази відносно землі (в фарадах на 1 км) обчислюється за наступними формулами [16] (всі розміри в метрах).

Одноланцюгова лінія без тросу:

$$c_{11} = \frac{1}{a_{11} + 2a_{12}} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6}, \quad (1.11)$$

де

$$a_{11} = 2 \ln \frac{2h_{\bar{n}0}}{r}; \quad a_{12} = 2 \ln \sqrt{\frac{4h_{cp}^2}{D_{cp}^2} + 1};$$

середня висота підвісу проводу над землею

$$h_{cp} = \frac{h_A + h_B + h_C}{3};$$

середня відстань між проводами

$$D_{cp} = \frac{D_{AB} + D_{AC} + D_{BC}}{3};$$

r — радіус проводу.

Одноланцюгова лінія з тросом:

$$c_{11} = \frac{1}{a_{11} + 2a_{12} - 3a_s} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6}. \quad (1.12)$$

Тут коефіцієнти a_{11} і a_{12} визначаються так як, раніше.

Вплив тросу враховується додатковим членом $3a_s$, який входить в знаменник величиною c_{11} . Постійна a_s визначається як:

$$a_s = \frac{a_{1s}^2}{a_{ss}}; \quad a_{1s} = \ln\left(\frac{4h_{cp}h_s}{D_{sep}^2} + 1\right);$$

$$a_{ss} = 2 \ln \frac{2h_s}{r_s}; \quad h_{cp} = \frac{h_A + h_B + h_C}{3},$$

де $D_{sep} = \sqrt[3]{D_{As}D_{Bs}D_{Cs}}$ — середня відстань між проводом і тросом; h_s — висота підвіски тросу; r_s — радіус тросу.

Із зрівняння формул (1.11) і (1.12) видно, що при наявності тросу ємність лінії збільшується.

Дволанцюгова лінія без тросів (визначається ємність одного проводу в припущенні взаємного симетричного розташування обох ланцюгів):

$$c_{11} = \frac{1}{a_{11} + a'_{11} + 2(a_{12} + a'_{12})} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6}. \quad (1.13)$$

Тут

$$a_{11} = 2 \ln \frac{2h_{\text{нд}}}{r}; \quad a_{12} = 2 \ln \sqrt{\frac{4h_{cp}^2}{D_{cp}^2} + 1}; \quad h_{cp} = \frac{h_A + h_B + h_C}{3};$$

$$D_{cp} = \frac{D_{AB} + D_{AC} + D_{BC}}{3}; \quad a'_{11} = 2 \ln \sqrt{\frac{4h_{cp}^2}{D_{i,i}^2} + 1};$$

$$D_{i,i} = \frac{D'_{A-A} + D'_{B-B} + D'_{C-C}}{3};$$

$$a'_{12} = 2 \ln \sqrt{\frac{4h_{cp}^2}{D_{cp}^2} + 1}; \quad D'_{cp} = \frac{D'_{A-B} + D'_{B-C} + D'_{A-C}}{3};$$

$D_{A-B}, D_{B-C}, D_{A-C}$ — відстані між фазами однієї і тієї ж лінії;

$D'_{A-A}, D'_{B-B}, D'_{C-C}$, $D'_{A-B}, D'_{B-C}, D'_{A-C}$ — відстань між проводами різних ланцюгів (індекси відповідають фазам A, B, C). Очевидно, при інших рівних умовах ємність одного ланцюга дволанцюгової лінії дещо менше, ніж ємність одноланцюгової лінії (ср. рівняння (1.11) і (1.13)).

Дволанцюгова лінія з одним тросом. Рівняння ємності в цьому випадку відрізняється від попереднього наявністю в знаменнику додаткового члена, який враховує вплив тросу,

$$c_{11} = \frac{1}{a_{11} + a'_{11} + 2(a_{12} + a'_{12}) - 3a_s} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6}. \quad (1.14)$$

Всі постійні величини, які входять у формулу (1.14), визначаються так, як у попередніх випадках.

Як приклад проведемо розрахунок ємності і струм замикання на землю на 1 км дволанцюгової трифазної лінії 35 кВ з тросом при основних розмірах, вказаних на рис. 4, а. Марка проводів АС-95, розрахунковий діаметр проводу 14 мм. Переріз сталевого тросу 50 мм², розрахунковий діаметр тросу 9 мм. Інші необхідні для розрахунку розміри визначаються графічно (рис. 1.4, додаток Б).

Знаходимо значення постійних, вхідних в рівняння (1.14):

$$h_{cp} = 13,75; D_{cp} \approx \frac{2+2+4}{3} = 2,67; D'_{cp} = \frac{5,1+5,55+6,3}{3} = 5,65;$$

$$D_{i.i} = \frac{4,5+4,9+5,3}{3} = 4,9; a_{11} = 2 \ln \frac{2 \cdot 13,75}{0,007} = 16,54;$$

$$a_{12} = 2 \ln \sqrt{\frac{4 \cdot 13,75^2}{2,67^2} + 1} = 4,68; a'_{11} = 2 \ln \sqrt{\frac{4 \cdot 13,75^2}{4,9^2} + 1} = 3,3;$$

$$a'_{12} = 2 \ln \sqrt{\frac{4 \cdot 13,75^2}{5,65^2} + 1} = 3,17; D_{sep} = \sqrt[3]{3,75 \cdot 5,5 \cdot 7,4} = 5,35;$$

$$a_{ss} = 2 \ln \frac{2 \cdot 18,75}{0,0045} = 18,06; a_{1s} = \ln \left(\frac{4 \cdot 13,75 \cdot 18,75}{28,5} + 1 \right) = 3,62;$$

$$a_s = \frac{3,62^2}{18,06} = 0,726.$$

Підставивши ці значення у рівняння (1.14), отримуємо ємність одного проводу

$$c_{11} = \frac{1}{16,54 + 3,3 + 2(4,68 + 3,17) - 3 \cdot 0,726} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6} = \frac{1}{35,54 - 2,18} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^6} \approx 0,33 \cdot 10^{-8} \text{ ф/км.}$$

Із цього розрахунку видно, що наявність тросу мало впливає на середню ємність лінії (при відсутності тросу c_{11} збільшення всього на $(\frac{2,18}{35,54} - 2,18)100 = 6,5\%$).

Середнє значення ємнісного струму (А) металевого однофазного замикання на землю при частоті 50 Гц на 1 км. повітряних і кабельних ліній наводиться в таблиці 1.1, додаток Б.

Ємнісний струм однофазного металевого замикання на землю на 1 км обох ланцюгів при робочій напрузі 35 кВ

$$I_{\zeta,i} = 2\sqrt{3} \cdot 36000 \cdot 314 \cdot 0,33 \cdot 10^{-8} = 0,129 \text{ А/км}$$

Ємність високовольтних кабелів сильно залежить від розмірів і взаємного розташування струмів ведучих жил і металевих оболонок. Аналітичний розрахунок ємності кабелів складний, через це слід користуватися заводськими даними. У додатку 1 вказані середні значення ємнісного струму металевого замикання на землю на 1 км повітряних і кабельних ліній [3].

Кінцеве визначення ємності системи, яке потрібне для розрахунку захисту чи для настройки котушки, рекомендується робити експериментальним шляхом.

В реальних умовах енергосистеми ємнісні струми замикання на землю мають різні величини — від декількох ампер в мережах малої протяжності (в особливості при повітряних лініях) до декількох десятків і сотень ампер в великих кабельних мережах. Так, наприклад, як видно із табл. 1, в кабельній мережі 6 кВ довжиною 100 км (орієнтовно для міста з числом жителів 200—300 тис.) цей струм досягає 60—70 А. Доволі великі ємнісні струми однофазного замикання на землю мають місце також і у випадку повітряних ліній у розгалужених мережах 35 кВ великих енергосистем.

1.3 Змінне однофазне замикання на землю

В системах електропостачання, під впливом атмосферних чи перехідних комутаційних процесів, виникають хвилі напруги, які впливають на робочу напругу фаз, створюючи при цьому імпульс перенапруги, який може викликати у системі, у місці ослабленої ізоляції, пробій фази на землю. В системі з ізольованою нейтраллю в місці замикання в деяких випадках (при достатній відстані між проводом землею) дуга горить нестійко, періодично гасне і знову запалюється (по мірі розігріву місця пошкодження нестійке горіння дуги переростає у стійке) [4].

Незалежно від причини виникнення замикання на землю викликає збільшення напруги у системі, обумовлене процесом перезарядження ємностей фаз відносно землі.

При обриві дуги, що являється результатом деіонізації дугового проміжку, вся система виявляється статично зарядженою відносно землі. При цьому вирівнювання заряду між фазами відбувається шляхом швидких затухаючих коливань, котрі не приймаються до уваги при аналізі процесу.

При перерві горіння дуги робочі напруги фаз накладаються на раніше вказаному залишкову напруга. При збільшенні напруги на пошкодженій фазі до величини, достатній для нового пробою, дуга з'являється знову. У цей момент напруга на пошкодженій фазі різко падає до нуля, а напруги непошкоджених фаз відповідно зростають, що супроводжується вільними коливаннями струмів і напруг непошкоджених фаз. Частота цих коливань (порядку декількох кілогерц) залежить від параметрів системи електропостачання. Далі дуга може знову обірватися і т. д.

Існують дві основні теорії, які описують даний процес. Згідно одної із цих теорій дуга у місці замикання на землю горить на протязі невеликого проміжку часу, гаснучи у момент першого чи одного із наступних проходжень через нуль струму високочастотного коливання, при чому цикл загорання і загасання повторюється у кожен півперіод робочої частоти. По другій теорії дуга загасає у момент проходження через нуль складовою струму робочої частоти і знову запалюється через півперіод цієї ж частоти, тобто раз за період.

Досвід експлуатації і проведені у останній час показали, що процес змынного замикання на землю залежить від величини струму дуги, співвідношення між його складовими основної і високої частоти, від інтенсивності деіонізації дугового проміжку і ін. В залежності від цих умов дуга загасає і знову загоряється в ті чи інші моменти часу.

На інтенсивність деіонізації впливають умови розтягування дуги: взаємне розташування електродів і відстані між ними, виникнення замикання у маслі чи у повітрі, швидкість вітру і ін.

У граничному випадку найбільша деіонізація дуга після першого загасання більше не відновлюється, у наступних випадках загасання супроводжується повторними запалюваннями.

В залежності від швидкості деіонізації обрив дуги відбувається в момент першого чи одного із наступних проходжень через нуль сумарного струму замикання на землю, а при порушенні умови стійкості горіння — набагато раніше. Якщо у струмі дуги переважає складова вільних високочастотних коливань, загасання може відбутися уже через декілька півперіодів високої частоти. У випадку достатньо швидкого затухання коливань і менш інтенсивної деіонізація дуга гасне у момент проходження через нуль струму робочої частоти.

Звичайно характер процесу переміжної дуги не постійний: різні його форми змінюють одна одну з різною послідовністю. Важливо відмітити, що переміжна дуги практично може бути в мережах з ізолюваною нейтраллю при будь-яких струмах замикання на землю. Хвильові процеси на лінії і провідності виток фаз знижують виникнення при цій перенапрузі [5].

У випадку протікання процесу згідно другої теорії дуга загасає і запалюється один раз на протязі кожного періоду робочої частоти. При цьому в продовж усього процесу напруги всіх трьох фаз і нейтралі мають постійну складову, яка досягає приблизно $\frac{U_{\phi}}{2}$.

За даними досліджень в ізолюваних мережах різних напруг перенапруги при дугових замиканнях на землю, незалежно від значення ємнісного струму, не перевищують наступних приблизних величин: на непошкоджених фазах — $3U_{\phi}$; на пошкодженій фазі — $1,73U_{\phi}$; на нейтралі — $1,5U_{\phi}$.

Таким чином, максимальна перенапруга не перевищує 1,73 від номінальної, що практично не представляє небезпеки для ізоляції машин, трансформаторів і ліній.

Слід відмітити, що ємнісні струми, які викликаються високочастотними коливаннями напруги, можуть на багато раз перевищувати струми металевого замикання нормальної частоти.

Миттєве значення ємнісного струму замикання на землю рівне

$$i_{\zeta} = c_A \frac{dU_{A-\zeta}}{dt} + c_B \frac{dU_{B-\zeta}}{dt} + c_C \frac{dU_{C-\zeta}}{dt}.$$

Враховуючи, що $C_A = C_B = C_C = C$, $U_{A-3} + U_{B-3} + U_{C-3} = 3U_0$ знаходимо

$$i_{\zeta} = 3c \frac{dU_0}{dt}. \quad (1.15)$$

Таким чином, незалежно від характеру режиму замикання на землю і горіння дуги миттєва величина цього струму завжди визначається ємністю системи і напругами нейтралі відносно землі згідно рівняння (1.15). При змінному замиканні несинусоїдальні напруги u_0 може бути розкладено на постійну частину і ряд гармонійних складових

$$U_0 = U_{0i\tilde{i}\tilde{n}\tilde{o}} + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(k\omega t + \varphi_k).$$

Кожна гармоніка напруги дає свою, випереджувальну її на 90° , складову струму замикання на землю

$$i_{\zeta} = 3 \sum_{k=1}^{\infty} k\omega c U_k \cos(k\omega t + \varphi_k).$$

По даним експлуатації, ефективні величини струмів змінного замикання трьох-чотирьох-кратних значень відповідних струмів металевого замикання.

Висновки до першого розділу

Аналіз досліджень показує, що сила струму замикання на землю в системі електропостачання залежить від опору заземлюючих пристроїв, увімкнених в нейтраль генераторів, трансформаторів, від ємності мережі.

На практиці обмотки машин і апаратів, мережі систем електропостачання, завжди мають розподілену ємність як між фазами, так і між кожною фазою і землею. Такі ємності сприяють виникненню додаткових струмів, які при нормальному режимі роботи додаються до струмів навантаження, замикаючись між фазами, а при однофазних замиканнях на землю проходять і по землі.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНОГО СТРУМУ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

2.1. Аналіз основних співвідношень при точній компенсації

Дослідження показують, що принцип компенсації закладений у тому, що на ємнісний струм у місці пошкодження накладається протилежний індуктивний струм. Компенсація виконується шляхом заземлення нейтралі системи в одній або декількох точках через дугогасну котушку або інший пристрій, що має приблизно постійний і практично індуктивний опір [4].

У рівняннях, наведених у цьому розділі, як і в попередньому викладі, не враховуються вищі гармоніки в складі робочих напруг системи, а отже, і в індуктуному і ємнісному струмі замикання на землю. При наявності цих гармонік в струмі замикання виникає додаткова складова, яка не може бути скомпенсована [6].

У системі, яка не має активних заземлюючих опорів, через дугогасні котушки з загальним опором \dot{Z}_o при стійкому замиканні, згідно (1.1), проходить струм

$$\dot{I}_{Z_o} = -\frac{\dot{U}_\phi}{R(3\dot{Z}_o j\omega C + 1) + \dot{Z}_o}$$

Для точної компенсації ($\dot{I}_{Z_o} = -\dot{I}_C$) потрібно, щоб індуктивний опір заземлюючої котушки був рівним сумарному ємнісному опору всіх фаз системи

$$L_o \omega = \frac{1}{3\omega C} \quad (2.1)$$

При цій умові, а також при відсутності активних заземлюючих опорів в місці пошкодження в перший момент замикання виникає швидко затухаючий розрядний струм високої частоти, а після його зникнення залишається тільки невеликий активний струм. Якщо не враховувати активних втрат і витоків, то

значення струму пошкодження при сталому замиканні знижується до нуля ($I_3 = 0$), а струм, що проходить в нейтралі, повністю замикається через ємності непошкоджених фаз (рис. 2.1, додаток Б).

На здорових фазах і нейтралі напруги в початковий момент підвищуються в результаті високочастотних коливань; потім вони досягають сталих значень, причому $\dot{U}_o = -\dot{U}_\phi$, а при замиканні в обмотці $\dot{U}_o = -b\dot{U}_\phi$.

Слід відмітити, що ця напруга не залежить від величини перехідного опору R в місці пошкодження. Напруга пошкодженої фази дорівнює нулю, і струм в ємності цієї фази відсутній незалежно від величини R .

У разі замикання через дугу, при недостатньому для її підтримки активного струму, пошкодження ліквідується негайно після вищевказаного початкового розрядного струму. Однак напруга пошкодженої фази відновлюється не відразу, а поступово (практично протягом декількох періодів робочої частоти). Це пояснюється тим, що після згасання дуги ємність системи ($3C$) і індуктивність котушки (L_o) утворює коливальний контур, власна частота якого дорівнює робочої частоті системи.

Вільний струм цього контуру обумовлює падіння напруги на котушці, в перший момент дорівнює робочій напрузі пошкодженої фази, і різниця потенціалів між фазою і землею деякий час дорівнює нулю.

З вищевказаного випливає, що компенсація ємнісного струму запобігає підвищенню напруги на пошкодженій фазі вище нормальної. Повторне запалювання дуги можливо тільки в тому випадку, коли напруга не більше U_ϕ . При цьому перенапруги на непошкоджених фазах, зумовлені високочастотними коливаннями, мають значно менші величини, ніж в мережі без компенсації.

Таким чином, при виконанні точної компенсації в мережі досягаються такі переваги:

1) майже повністю усуваються струми замикання на землю в місці пошкодження;

2) більшість дугових замикань повністю ліквідуються безпосередньо після їх виникнення;

3) обмежуються перенапруги в системі при переміжних замиканнях. Найбільш ефективними є перші дві переваги. Що стосується зниження перенапруг, то, враховуючи їх порівняно невелику величину (див. гл. I) і періодичні профілактичні випробування ізоляції, можна вважати, що це зниження грає меншу роль.

2.2 Розбалансування компенсуючих (дугогасних) пристроїв

На практиці, незважаючи на переваги точної компенсації, як правило застосовуються розбалансування індуктивних апаратів для гасіння дуги. Це пов'язано з небезпекою підвищення напруги у системі електропостачання при нормальному режимі роботи в результаті резонансу між індуктивністю котушки і ємністю.

Проаналізуємо причини виникнення резонансу.

Дослідження показують, що фазні електрорушійні сили генераторів симетричні і ємності фаз мережі однакові і тому напруга нейтралі при нормальній роботі системи буде дорівнювати нулю [7].

З практичної точки зору при експлуатації часто мають місце відхилення від цих умов симетрії, особливо при недостатній транспозиції фаз на лініях.

Відомо що, при ізольованій нейтралі, відсутності втрат і витоків зміщення напруга основної частоти дорівнює:

$$\dot{U}_o' = \frac{\dot{U}_A \dot{c}_A + \dot{U}_B \dot{c}_B + \dot{U}_C \dot{c}_C}{\dot{c}_A + \dot{c}_B + \dot{c}_C}. \quad (2.2)$$

З цього рівняння випливає, що зміщення нейтралі при нормальній роботі залежить від несиметрії напруг джерела і від несиметрії ємностей мережі.

При включенні заземлювальної котушки, налаштованої на точну компенсацію за формулою

$$L_{оточн} \omega = \frac{1}{(\dot{c}_A + \dot{c}_B + \dot{c}_C) \omega}. \quad (2.3)$$

Індуктивність котушки і ємність фаз утворюють налаштований в резонанс з робочою частотою системи (у випадку трифазної несиметричною мережі схема відрізняється тільки тим, що загальна ємність складається із суми $\dot{c}_A + \dot{c}_B + \dot{c}_C$).

Напряга \dot{U}_o' , включене в цей контур послідовно, створює резонанс напруг, причому на котушці і всіх фазах системи виникають теоретично нескінченно великі напруги відносно землі (практично активні опори обмежують ці напруги, але все ж вони можуть у багато разів перевершувати \dot{U}_o'). Для запобігання цьому явищу індуктивність котушки повинна відрізнятися від отриманої за формулою 2.3. При такій неточності налаштування дугогасильного апарата напруга нейтралі системи, згідно теоремі про еквівалентний генератор, дорівнюватиме:

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_o' jL_o \omega}{jL_o \omega + \frac{1}{j\omega(\dot{c}_A + \dot{c}_B + \dot{c}_C)}} = \frac{\dot{U}_o' jL_o \omega}{L_o \omega - \frac{1}{\omega(\dot{c}_A + \dot{c}_B + \dot{c}_C)}}. \quad (2.4)$$

Введемо позначення: $\frac{U_o'}{U_o} = \gamma$ - при відсутності котушки, віднесене до зміщення нейтралі при включеній котушці; $\frac{L_o}{L_{оточн}} = \rho$ - відношення індуктивностей котушки при неточній і точному налаштуваннях.

На підставі (2.4) очевидно, що γ і ρ пов'язані між собою залежністю

$$\gamma = \frac{\rho - 1}{\rho} \quad (2.5)$$

Наближено приймаючи $\dot{c}_A = \dot{c}_B = \dot{c}_C = c$, згідно (1.9) знаходимо залишковий струм повного металевого замикання на землю: $I_{3.n} = U_\phi (3\omega C - \frac{1}{L\omega})$, або, підставляючи значення ρ і γ ,

$$I_{3.n} = U_\phi 3\omega C (1 - \frac{1}{\rho}) = 3U_\phi \omega C \gamma; \quad (2.6)$$

звідси знаходимо також

$$\gamma = \frac{U'_o}{U_o} = \frac{I_{3.n}}{I_C}. \quad (2.7)$$

Отже, відношення напруг нейтралі при відключеній і включеній котушці рівне відношенню залишкового струму розбалансування до ємнісному струму замикання на землю. Зазвичай γ називають *коефіцієнтом розбалансування котушки*.

На рис. 2.2 показано залежність γ від ρ . З цього рисунка видно, що навіть невелике відхилення індуктивності котушки від $L_{оточн}$ призводить до різкого збільшення залишкового струму і до зниження напруги нейтралі.

Експлуатаційний досвід показує, що при деякій розбалансованості компенсації зазначені в розділі 1 переваги не втрачаються: навіть при порівняно великій розбалансованості застосування дугогасильні апаратів вельми ефективно. Відхилення від точної настройки до $\gamma = \pm 20\%$ практично не перешкоджають гасінню дуги, причому повторні запалювання в більшості випадків вже не мають місця, а перенапруги досягають менших величин, ніж при ізолюваній нейтралі.

Максимальною величиною залишкового струму, при якому запобігається повторне запалення дуги на повітряних лініях, слід вважати 30 – 40 А при $\gamma = \pm 20\%$. Статистичні дані показують що, до 80% однофазних замикань на землю в повітряних мережах при таких струмах не балансу автоматично ліквідуються без відключення ліній.

Важливо відзначити, що в електричних мережах з ізольованою нейтраллю ємнісні струми замикання на землю такої ж величини зазвичай призводять до стійкого горіння дуги (останнє пояснюється швидким відновленням напруги на пошкодженій фазі в мережах з ізольованою нейтраллю). Дюгові замикання в кабельних мережах мають місце значно рідше, ніж у повітряних. Замикання тут частіше мають стійкий характер. Однак застосування компенсації в розгалужених кабельних мережах не менш ефективно, ніж у повітряних, завдяки зниженню струмів замикання на землю. Гранична величина струму замикання на землю в кабелях, при якій однофазне ушкодження зазвичай не переходить у між фазне коротке замикання, становить близько 15 – 30 А як у компенсованих мережах, так і в мережах з ізольованою нейтраллю [5].

Висновки до другого розділу

Дослідження показують, що принцип компенсації закладений у тому, що на ємнісний струм у місці пошкодження накладається протилежний індуктивний струм. Компенсація виконується шляхом заземлення нейтралі системи в одній або декількох точках через дугогасну котушку або інший пристрій, що має приблизно постійний і практично індуктивний опір.

Важливо відзначити, що в електричних мережах з ізольованою нейтраллю ємнісні струми замикання на землю такої ж величини зазвичай призводять до стійкого горіння дуги (останнє пояснюється швидким відновленням напруги на пошкодженій фазі в мережах з ізольованою нейтраллю).

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ, АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНОК ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

3.1 Розрахунок ємнісного струму замикання на землю кабельної мережі через перехідні опори $R_d=70$ Ом і $R_d=0$

Розглянемо дослідження, аналіз та розрахунок ємнісного струму замикання на землю кабельної мережі на прикладі [8].

Довжина трифазних кабелів з поясною ізоляцією мережі 10 кВ, що живиться з шин електростанції, дорівнює 50 км, з них кабелі перерізами 95мм^2 довжиною 14 км, 120мм^2 – 20 км, 150мм^2 – 10 км і 185мм^2 - 6 км.

На рис. 3.1, *a* наведена вихідна схема для розрахунку ємності $C_{мф}$ і C_0 , які є відповідно ємностями між фазами і ємністю фаз відносно землі всіх елементів, електрично пов'язаних з мережею даної напруги. Перетворимо трикутник з ємностями $C_{мф}$ в еквівалентну зірку, отримаємо, що ємності зірки $C = 3C_{мф}$. Ця зірка показана штрихованими лініями.

Через ємності $C = 3C_{мф}$ і C_0 протікають струми прямої та зворотної послідовності, а через C_0 тільки струми нульової послідовності [11].

Еквівалентну ємність $C_{роб} = C_0 + 3C_{мф}$ називають робочою або ємністю фази лінії. Через робочу ємність $C_{роб}$ в нормальному режимі обчислюють зарядні ємнісні струми, тому її називають також зарядною.

При замиканні фази на землю ємність C_0 даної фази зашунтованою місцем замикання, тому струм замикання I_3 повертається до джерела живлення через ємність C_0 двох непошкоджених фаз.

На рис. 3.1, *б* за методом симетричних складових приведена комплексна схема заміщення при замиканні на землю фази *A* через опір R_d .

Слід підкреслити, що опір джерела живлення $x_{1Г}$, $x_{2Г}$ в багато разів менше ємнісного опору $x_{c,роб}$, тому у схемах прямої і зворотної послідовності вони шунтують ємність $x_{c,роб}$. Крім того, опорамі ліній також нехтують і внаслідок відносно малих значень струмів замикання на землю, а також вважають, що напруга джерела зберігається незмінною. У цьому випадку комплексна схема значно спрощується і приймає вигляд розрахункової, наведеної на рис. 3.1,в

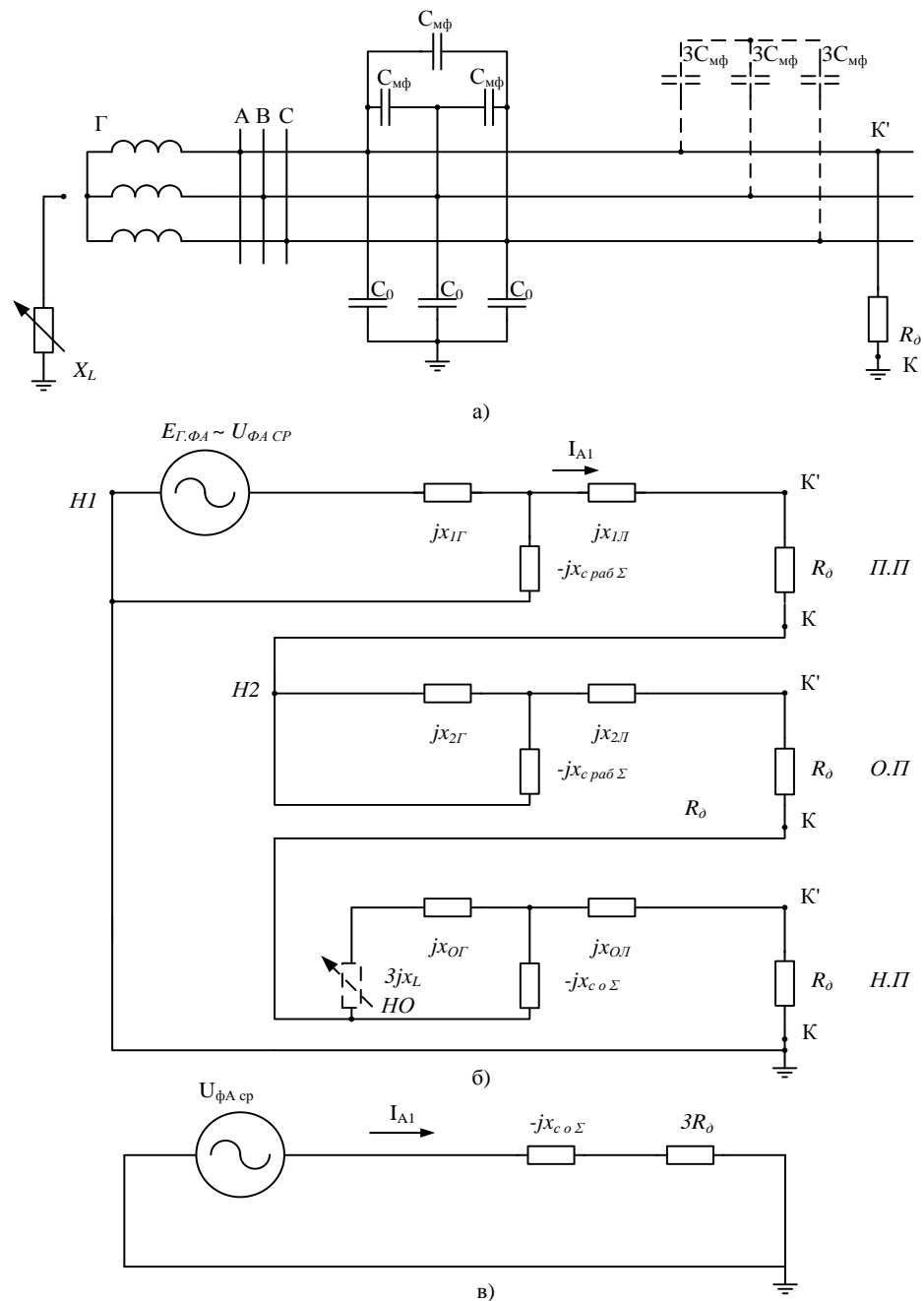


Рисунок 3.1.- Розрахункові схеми однофазного замикання на землю, а вихідна схема мережі з ізольованою нейтраллю; б і в – схеми заміщення при замиканні фази А через перехідний опір; П.П, З.П, Н.П – пряма, зворотна, нульова послідовність.

Визначаємо сумарну ємність $C_{роб}$ кабелів 95,120,150 і 180мм²:

$$C_{роб} = 0.42 \cdot 14 + 0.46 \cdot 20 + 0.51 \cdot 10 + 0.53 \cdot 6 = 23.36 \text{ мкФ},$$

де коефіцієнти 0.42; 0.46; 0.51 і 0.53 за цих довжин кабелів є питомими робочими ємностями, мкФ/км.

Сумарна ємність однієї фази мережі складає

$$C_{0\Sigma} \approx 056, C_{роб} = 0,56 \cdot 23,63 = 13,1 \text{ мкФ}.$$

Ємнісний опір однієї фази мережі по відношенню до землі

$$x_{co\Sigma} = 1 / (\omega C_{0\Sigma}) = 1 / (314 \cdot 13,1 \cdot 10^{-6}) = 243 \text{ Ом}.$$

Приймаючи, що вектор фазної середньої номінальної напруги збігається з віссю $+j$, тобто $U_{ф.ср} = jU_{ф.ср}$, струм замикання на землю через перехідний опір обчислюється на основі розрахункової схеми (рис. 4.1, в) і при $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} \approx 0$ маємо:

$$I_3 = 3I_{A1}^{(1)} = 3I_{A2}^{(1)} = 3I_0^{(1)} = 3U_{ф.ср} / (3R_D - jx_{\Sigma 0C}) = j3 \cdot 3640 / (3 \cdot 70 - j243) = \\ = j3 \cdot 3640 / 321e^{-j49^0} = 34e^{j139^0} \text{ А}; I_3 = 34 \text{ А}.$$

$$\text{При } R_D = 0; I_3 = 3 \frac{U_{ф.ср}}{-jx_{0C\Sigma}} = \frac{j3 \cdot 3640}{-j243} = -44,9; I_3 = 44,9 \text{ А}.$$

Абсолютне значення I_3 можна визначити по формулі

$$I_3 = 3U_{ф.ср} \omega C_{0\Sigma} 10^{-6} = 3 \cdot 3640 \cdot 314 \cdot 13,1 \cdot 10^{-6} = 44,9 \text{ А}.$$

При відсутності даних про кабельні мережі, але відомої загальної довжині мережі наводяться такі наближені формули для визначення I_3 ; для повітряних мереж

$$I_3 = U_{мф} l / 350 \quad (3.1)$$

для кабельних мереж

$$I_3 = U_{мф} l / 10, \quad (3.2)$$

де $U_{мф}$ - міжфазна напруга, кВ; l – довжина електричного зв'язку мережі даної напруги, км.

Обчислимо I_3 по цій формулі $I_3 = 6.3 \cdot 50 / 10 = 31.5$ А.

Наближена формула дає похибку 30%.

3.2 Розрахунок ємнісного струму на початку пошкодженої кабельної лінії

На рис. 3.2 приведена схема однієї фази кабельної мережі 10 кВ, що складається з трьох кабелів з поясною ізоляцією [9].

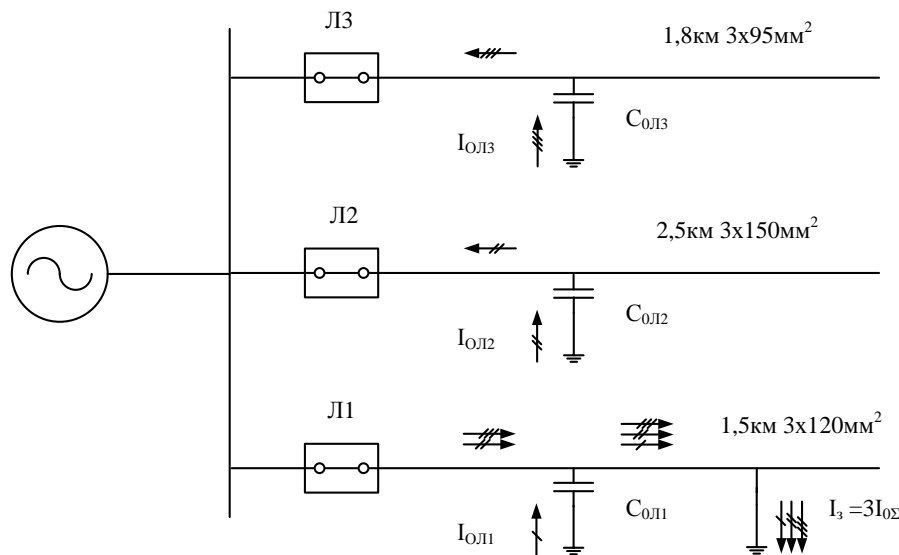


Рисунок 3.2.- Розрахункова схема кабельної електричної мережі

За даними наведеними на цьому малюнку, обчислити струм нульової послідовності, що протікає на початку лінії Л1, на якій в кінці є металеве замикання на землю одної з фаз.

З рис. 3.2 видно, що через лінію Л1, на якій має місце замикання на землю, на її початку протікають струми нульової послідовності непошкоджених ліній Л2 і Л3. Струм нульової послідовності пошкодженої лінії циркулює між місцем замикання на землю і своєю зосередженою ємністю C_{0L1} . Отже на початку лінії цей струм відсутній.

При відомій ємності по відношенню до землі однієї фази електрично пов'язаної мережі $C_{0\Sigma}$ і ємності однієї з пошкоджених ліній C_{0L} струм нульової послідовності на початку цієї лінії обчислюється за формулою

$$I_{0L} = \omega U_{\phi.CP} (C_{0\Sigma} - C_{0L}) \cdot 10^{-6} = \omega U_{\phi.CP} C_{0\phi} \cdot 10^{-6} \text{ А,}$$

де $\omega = 314$ - кутова частота, рад/с; $U_{\phi.CP}$ - середня фазна напруга мережі, В; $C_{0\Sigma}, C_{0L}$ - ємності, мкФ; $C_{0\phi} = C_{0\Sigma} - C_{0L}$ - ємності неушкоджених ліній.

Використовуючи попередні вирази, обчислюємо

$$\begin{aligned} C_{0\phi} &= 0,56_{C_{\text{уд.раб.л2}}} L_{\text{л2}} + 0,56_{C_{\text{уд.раб.л3}}} L_{\text{л3}} = \\ &= 0,56 \cdot 0,44 \cdot 2,5 + 0,56 \cdot 0,35 \cdot 1,8 = 0,97 \text{ мкФ.} \end{aligned}$$

$$I_{0L1} = 314(10500 / \sqrt{3}) 0,97 \cdot 10^{-6} = 1,85 \text{ А.}$$

Струм I_{0L1} , що протікає по лінії при зовнішньому (поза цією лінією) замиканні на землю дорівнює

$$\begin{aligned} I_{0L1} &= \omega U_{\phi.cp} C_{0L1} \cdot 10^{-6} = \omega U_{\phi.cp} 0,56_{C_{\text{уд.раб.л1}}} L_{\text{л1}} \cdot 10^{-6} = \\ &= 314(10500 / \sqrt{3}) 0,56 \cdot 0,37 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} = 0,592 \text{ А.} \end{aligned}$$

3.3 Визначення опору дугогасильного реактора

Мережа 35кв з ізолюваною нейтраллю складається з повітряних ліній різних конструкцій загальною довжиною 250 км.

Оскільки відсутні дані про конструктивні особливості окремих ділянок ліній, струм замикання на землю доводиться визначати за наближеною формулою (3.1) для повітряних мереж, наведеної в задачі 3.1:

$$I_3 = U_{\text{мф.ср}} L / 350 = 37 \cdot 250 / 350 = 26.4 \text{ А,}$$

де - $U_{\text{мф.ср}} = 37 \text{ кВ.}$

Величина цього струму близька до струму, обчисленому за конструктивними даними.

З формули, наведеній в розділі 4.1, $I_3 = 3U_{\text{ф.ср}} \omega C_{\text{co}\Sigma} \cdot 10^{-6}$ визначаємо

$$C_{\text{co}\Sigma} = I_3 10^6 / (3U_{\text{ф.ср}} \omega) = 26,4 \cdot 10^6 / [3(37000 / \sqrt{3})314] = 1,31 \text{ мкФ.}$$

Ємнісний опір по відношенню до землі однієї фази всієї мережі даної напруги

$$x_{\text{co}\Sigma} = 1 / (\omega C_{\text{co}\Sigma} 10^{-6}) = 10^6 / (314 \cdot 1,31) = 2430 \text{ Ом.}$$

Для компенсації ємнісного струму в нейтраль генератора або нейтралі обмоток трансформаторів Y/Δ , з'єднаних в зірку і електрично пов'язаних з мережею даної напруги, включають дугогасні реактори з регульованою індуктивністю. Через цей реактор буде протікати потроєний струм нульової послідовності, тому в схемі цей опір вводиться потроєною величиною. Для того щоб був відсутній струм замикання на землю, еквівалентний опір у схемі нульової послідовності (рис.4.1,б) має дорівнювати нескінченості, тобто

$$x_{0C} = 3jx_L(-jx_{\text{co}\Sigma}) / (3jx_L - jx_{\text{co}\Sigma}) = \infty.$$

Зазначена рівність можлива, коли $3jx_L - jx_{\text{co}\Sigma} = 0$ або $x_L = x_{\text{co}\Sigma} / 3 = 2430 / 3 = 810 \text{ Ом.}$

У цьому випадку має місце резонанс між індуктивністю і ємністю.

3.4 Негативні наслідки однофазних замикань на землю в електричних мережах

У мережі з ізольованою чи заземленою через дугогасний реактор нейтраллю однофазне замикання на землю не супроводжується протіканням великих струмів, а призводить до зміни розподілу ємнісних струмів на "землю" та до зміни фазних напруг, відносно "землі". Лінійні напруги залишаються незмінними і тому за однофазних замикань на землю такі мережі можуть продовжувати роботу і забезпечувати живлення споживачів. Однак, тривала робота мережі з однією заземленою фазою небезпечна внаслідок несиметрії фазних напруг і появи перенапруг від дугових замикань на землю. При цьому підвищується вірогідність пошкодження ослабленої або дефектної ізоляції на інших фазах і виникнення режиму подвійного замикання на землю. Крім цього, за однофазних замикань на землю на ПЛ 6-10 кВ можлива поява на залізобетонних опорах небезпечної напруги дотику, а також можливе пошкодження цих опор від протікання струму замикання на землю. Щоб зменшити шкідливі та небезпечні наслідки однофазного замикання на землю персонал зобов'язаний за появи "землі" негайно розпочати відшукування пошкодженої ділянки мережі та вимкнення її. Терміновість ремонту пошкодженої ділянки визначається керівництвом мереж у кожному конкретному випадку і, в першу чергу, залежить від стану забезпечення живлення споживачів [10].

У нормальному режимі через дугогасний реактор протікають незначні струми, які визначаються величиною напруги нейтралі трансформатора, до якого під'єднаний реактор.

У разі появи однофазного замикання на землю через обмотку реактора протікає струм компенсації ємнісного струму однофазного замикання, величина якого визначає тривалість роботи реактора.

У мережах генераторної напруги, а також в мережах, до яких під'єднані двигуни високої напруги, замикання на землю в обмотці статора

супроводжується струмом, який проходить через магнітопровід статора і пошкоджує сталь. Розміри пошкодження залежать від величини струму і тривалості його протікання, чим і пояснюються обмеження тривалості роботи із замиканням на землю в таких мережах.

Крім цього, тривалість однофазного замикання на землю в мережі генераторної напруги необхідно обмежити в часі, виходячи з того, що існує небезпека пробою другої фази в ослабленому місці ізоляції обмотки електричної машини. Такий пробій може призвести до важких наслідків для електричної машини внаслідок протікання струмів між фазного короткого замикання. Компенсацію ємнісного струму замикання на землю дугогасними реакторами необхідно застосовувати за ємнісних струмів, що перевищують значення, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Граничне значення струмів замикання на землю

Номінальна напруга мережі, кВ	6	10	15-20	35
Ємнісний струм замикання на землю, А	30	20	15	10

Електричні мережі напругою 6, 10 і 35 кВ за струмів замикання на землю, які не перевищують значень, указаних в табл. 5.1, працюють, як правило, з ізольованою нейтраллю. За більших струмів зростає термічна дія дуги в місці замикання та збільшується вірогідність переходу дуги і однофазного замикання на землю в коротке замикання між фазами. Запобігти розвитку дугових замикань на землю можна включенням у нейтраль трансформатора дугогасного реактора. Захисна дія реактора полягає в зменшенні струму замикання на землю внаслідок накладання на ємнісний струм мережі зміщеного відносно до нього на 180° індуктивного струму, утвореного реактором.

У мережах 6—35 кВ з ПЛ на залізобетонних і металевих опорах за струмів замикання на землю понад 10 А термічна дія струму може призвести до

висихання ґрунту біля опори, збільшення опору заземлення опори з пошкодженою ізоляцією. Це, в свою чергу, призведе до різкого збільшення крокової напруги і напруги дотику поблизу місця замикання на землю, що становить небезпеку для людей і тварин. Крім цього, струм замикання призводить до пошкодження арматури опори і втрати нею механічної міцності. В експлуатації замикання на землю необхідно ліквідувати якомога швидше, а опори, на яких воно мало місце, брати на облік з тим, щоб не допустити підйому персоналу на них і запобігати нещасним випадкам.

Висновки до третього розділу

Проведено дослідження, аналіз та розрахунок однофазних замикань на землю.

Розглянуто дослідження, аналіз та розрахунок ємкісного струму замикання на землю кабельної мережі.

Визначені негативні наслідки однофазних замикань на землю в електричних мережах.

У мережах генераторної напруги, а також в мережах, до яких під'єднані двигуни високої напруги, замикання на землю в обмотці статора супроводжується струмом, який проходить через магнітопровід статора і пошкоджує сталь. Розміри пошкодження залежать від величини струму і тривалості його протікання, чим і пояснюються обмеження тривалості роботи із замиканням на землю в таких мережах.

Крім цього, тривалість однофазного замикання на землю в мережі генераторної напруги необхідно обмежити в часі, виходячи з того, що існує небезпека пробією другої фази в ослабленому місці ізоляції обмотки електричної машини. Такий пробій може призвести до важких наслідків для електричної машини внаслідок протікання струмів між фазного короткого замикання. Компенсацію ємнісного струму замикання на землю дугогасними реакторами необхідно застосовувати за ємнісних струмів, що перевищують значення, які наведені у таблиці 3.1.

ВИСНОВКИ

Згідно проведених теоретичних та експериментальних досліджень, будуть розроблені практичні рекомендації з обґрунтування режиму роботи нейтралі в розподільних мережах 10-35 кВ з урахуванням типу мережі та її характеристик.

В електричних мережах з високими ємнісним струмом однофазного замикання на землю, які працюють з компенсованою нейтраллю, пропонується використовувати комбіноване заземлення нейтралі шляхом вмикання паралельно до дугогасильного реактора високоомного резистора, що дасть можливість забезпечити необхідну чутливість та селективність релейного захисту, зменшити рівень перенапруг при неточній компенсації, і, як наслідок, зменшити можливі збитки та підвищити загальну надійність роботи розподільних мереж 10-35 кВ систем електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анализ эффективности существующих режимов нейтрали сетей 6–35 кВ в энергетике / Б. С. Стогний, В. В. Масляник, В. В. Назаров [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 3. – С. 37–41.
2. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006.
3. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. – 2010. – №2. – С. 36–43.
4. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 10 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 101-104.
5. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: Уч. пособие / Под редакцией Гриба О.Г. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 272 с.
6. Мусиенко А. Г. Пути повышения надежности работы городских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ / А. Г. Мусиенко, В. Ф. Сивокобыленко, М. П. Дергилев // Электрические сети и системы. – 2003. – № 3. – С. 18–26.
7. Харкута К. С. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства / К. С. Харкута, С. В. Яницкий, Э. В. Ляш. – М.: Агропромиздат, 1992. – 223 с.
8. Качесов В. Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях / В. Е. Качесов, В. Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // Электрические станции. – 2002. – № 8. – С. 38–45.
9. Єрмолаєв С.О. Проектування систем електропостачання в АПК – М.. Люкс, 1990 – 482с.
10. Будзко И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. // 2-е узд. перераб. и доп. / И. А. Будзко, М. С. Левин – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.

11. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу: Підручник. / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011. – 448 с.
12. Василега П. О. Електропостачання: Навчальний посібник / П. О. Василега. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.
13. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда // 2-ге вил. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 488 с.
14. Харкута К. С. Практикум по електропостачанню сільського господарства / К. С. Харкута, С. В. Яницький, Э. В. Ляш. – М.: Агропромиздат, 1992. – 223 с.
15. Будзко И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. // 2-е изд. перераб. и доп. / И. А. Будзко, М. С. Левин – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
16. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства. / И. А. Будзко, М. М. Зуль – М.: Агропромиздат, 1990. - 496 с.
17. Воробьев В. А. Электрификация сельскохозяйственного производства. – М.: Агропромиздат, 1985. - 208 с.
18. Методичні настанови та завдання до курсового проекту з дисципліни «Енергозабезпечення та електропостачання сільського господарства» для студентів спеціальності 6.091.900 «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/ Укл. Ю. О. Варецький. – Львів: Видавництво Львівського державного аграрного університету, 2004. – 32 с.
19. Блок В. М. Электрические сети и системы: учебное пособие / В. М. Блок. – М.: «Высшая школа», 1986. – 432 с.
20. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику: ГКД - 340000002-97. – К. : Минэнерго Украины, 1997. – 103 с.
21. Буслова Н. В. Электрические системы и сети: учебник для студ. электроэнергетич. спец. вузов / Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. И. Денисенко, В. С. Перхач ; под ред. Г. И. Денисенко – К. : Вища школа,

1986. – 584 с.

22. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов / В. И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989, – 592 с.

23. Поспелов Г.Е. Проектирование электрических сетей и систем: Учебное пособие для вузов / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. // 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 308 с., ил.

24. Сулейманов В. М. Электричні мережі та системи. Підруч. для вузів / В. М. Сулейманов., Т. Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 504 с.

25. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985 - 352с.

26. Півняк Г.Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання: Навч. посібник / Г.Г.Півняк, Н.С.Волотковська, Г.А.Кігель, А.В.Коротун. За ред. Г.Г.Півняка. – К.: ІЗМН, 1998. – 136 с.

27. Стандарт підприємства. Курсовий і дипломний проекти. Вимоги до змісту та оформлення: СТП 020708555-03-99. - Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 1999. - 72 с.

28. ДСТУ 3008-95 “Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. -К.: Держстандарт України, 1995. - 37 с

29. Марчевський В. М. Конструкторська документація курсових і дипломних проектів: Навч.посібник для студ. вищ. навч. заклад / В. М. Марчевський. –К.: Норіта-плюс. 2006.-280 с.

30. Правила улаштування електроустановок, вид. 3-тє, перероб. і доп. – Київ: МінпаливенергоУкраїни, 2010. – 736 с.

31. Визначення поточних параметрів режиму ЕЕС в умовах неповноти початкових даних із застосуванням засобів нейронного моделювання [Електронний ресурс] / Петро Лежнюк, Олена Рубаненко // Збірник наукових праць ВНТУ. – 2008. – № 2. – Режим доступу до журналу:http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-4/2008.files/uk/08pduf_m_uk.pdf