

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Дослідження процесу зміни електричних величин при
однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах
напругою вище 1000 В»

КНУ.МР.141.24.779-03

Виконав студент II курсу , групи СЕР-23м /Валентин ГЛУЩЕНКО/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Системи електропостачання промислових підприємств,

міст та локальних об'єктів»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Нормоконтролер:

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Олексій МИХАЙЛЕНКО/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ГЛУЩЕНКО Валентин Станіславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження процесу зміни електричних величин при
однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах
напругою вище 1000 В

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження процесу
зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у
розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Характеристика мережі живлення та типів її пошкодження; II.
Дослідження методів визначення процесу зміни електричних величин при
однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах
напругою вище 1000 В.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Класифікація однофазних замикань на землю; II. Форми струму
при однофазному замиканні на землю; III. Стійкість мережі живлення при
однофазному замиканні на землю; IV. Розрахунок зміни електричних величин
при однофазному замиканні на землю; V. Зміна електричних величин при
однофазному замиканні на землю у ненавантаженій лінії. -

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристика мережі живлення	10.09.24
2	Характеристика однофазного замикання на землю	17.09.24
3	Стійкість однофазного замикання на землю	19.10.24
4	Дослідження методів визначення процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю	24.10.24
5	Дослідження ефективності методів визначення процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю	30.11.24
6	Заходи забезпечення безпеки при однофазному замиканні на землю	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Валентин ГЛУЩЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В»

Метою роботи є дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В.

У роботі розглянуто процес зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В. Запропоновано метод встановлення характеристик однофазного пошкодження у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В та визначено загальні закономірності зміни електричних параметрів для способу захисту у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В при однофазному замиканні на землю з використанням шунтування. Також досліджено метод зменшення втрати напруги у мережі живлення при застосуванні захисних заходів, а також зроблено оцінку ефективності впровадження запропонованих рішень.

Ключові слова: РОЗПОДІЛЬЧА ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, ЗМІНА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН, ОДНОФАЗНЕ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ, ЗАХИСТ ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ЗАМИКАННІ НА ЗЕМЛЮ

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Характеристика мережі живлення та типів її пошкодження.....	10
1.1. Характеристика мережі живлення відповідно до навантажень та елементів	10
1.2. Характеристика однофазного замикання на землю.....	12
1.3. Стійкість однофазного замикання на землю	16
1.4. Параметри та електричні величини при однофазному замиканні на землю	20
1.5. Методи визначення характеристик при однофазному замиканні на землю у мережі живлення	26
Розділ 2. Дослідження методів визначення процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В.....	30
2.1. Теоретичні розрахунки зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю	30
2.2. Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю	32
2.3. Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у ненавантаженій лінії	35
2.4. Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії	42
2.5. Дослідження ефективності методів визначення процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю.....	47
2.6. Дослідження процесу зниження напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії.....	51

2.7. Дослідження стану ізоляції при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії.....	57
2.8. Заходи забезпечення безпеки при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії.....	60
Висновки	66

Вступ

Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю є важливим питанням для функціонування розподільчих електричних мережах, особливо тих у яких напруга живлення є вищою за 1000 В.

Надійність роботи системи електропостачання тісно перетинається із питанням спрацьовування захисту.

Одним з поширених методів захисту електричної мережі є метод захисного відключення.

При цьому втрачається можливість роботи з діючим електричним навантаженням.

Таким чином необхідним є можливість приєднання до резервного джерела живлення, що забезпечить безперебійність роботи мережі живлення у цілому.

Також слід зазначити, що одним з проявів послідовного убезпечення роботи обладнання станцій та підстанцій є можливість застосовувати своєчасне захисне шунтування пошкодженої ділянки мережі живлення при виникненні короткого замикання.

Дослідження що вказують на швидкоплинний характер розповсюдження аварійних струмів у мережі при виникненні коротких замикань свідчать про необхідність швидкого виявлення подібних процесів у мережі живлення для своєчасного припинення їх шкідливої дії на стан та роботу обладнання.

Необхідною умовою для формування алгоритмів відпрацьовування системи захисту обладнання станцій та підстанцій є розрахунок струмів щодо

визначення характеру протікання процесів у розподільчій мережі відносно навантаження.

Розрахунок струмів є необхідною умовою для визначення характеру аварійного режиму.

Важливою складовою при цьому є ступінь пошкодження, що буде відповідати характеру протікання перехідних процесів відповідно до аварійного виникнення при перехідному процесі у джерелі живлення, що має наявні ознаки режиму короткого замикання, що може відбуватися у різних ступенях:

- Між «фазою» та «нульовим» або «заземлюючим» дротом мережі або навантаження;
- Між «фазою» та «фазою» мережі або навантаження;
- Між декількома «фазами» та «нульовим» або «заземлюючим» дротом мережі або навантаження;
- Між декількома «фазами» мережі або навантаження.

Наступною задачею щодо виявлення характерних ознак розвитку аварійної ситуації є розділення подібних процесів та зняття струмових характеристик.

Останні дозволяють зробити аналіз протікання перехідних процесів що буде відрізнитись за швидкістю наростання фронту струму та його амплітудного значення.

Таким чином можна зробити висновок щодо можливості застосування тої чи іншою методики.

Для вирішення задачі точного настроювання захисного обладнання слід скласти схему заміщення та розрахувати параметри джерела живлення та навантаження у електричній мережі, що сприятиме полегшеному

розрахунку уставок захисних спрацьовувань при виявленні ознак аварійної ситуації.

Таким чином точність розрахунків зміни параметрів мережі живлення впливатиме на своєчасність виявлення аварійних режимів та припинення їх розповсюдження.

Розділ 1. Характеристика мережі живлення та типів її пошкодження

1.1. Характеристика мережі живлення відповідно до навантажень та елементів

Мережа живлення з огляду можливості її функціонування має обмежений ресурс щодо роботи у аварійних ситуаціях, що спричиняє пошкодження обладнання.

За впливом на кабельні лінії та їх розподільчі пристрої слід розрізняти локальні ушкодження та можливі прояви загального пошкодження обладнання.

При забезпеченні живлення навантаження від джерела живлення за допомогою трифазної мережі може виникнути ряд можливих варіантів розвитку аварійних ситуацій.

Всі вони мають як можна скоріше бути припиненими при дії відповідних методів захисту.

Розглянемо найпоширеніші прояви подібних ситуацій що можуть виникнути у мережі.

Таблиця 1.1 – Розподіл пошкоджень повітряних та кабельних ліній напругою 6 - 10 кВ

Причини пошкодження	Пошкоджуваність %
Природне старіння ізоляції	27,3
Недосконалість конструкції	16,6
Низька якість монтажу	5,3
Низький рівень експлуатації	6,1
Атмосферно-кліматичні дії	19,6
Сторонні дії (пошкодження механізмами, накиди, замикання птахами, низові пожежі і т. д.)	25,1

1.2. Характеристика однофазного замикання на землю

Розглянемо найхарактерніші моменти при одному з найпоширеніших видів аварійних режимів.

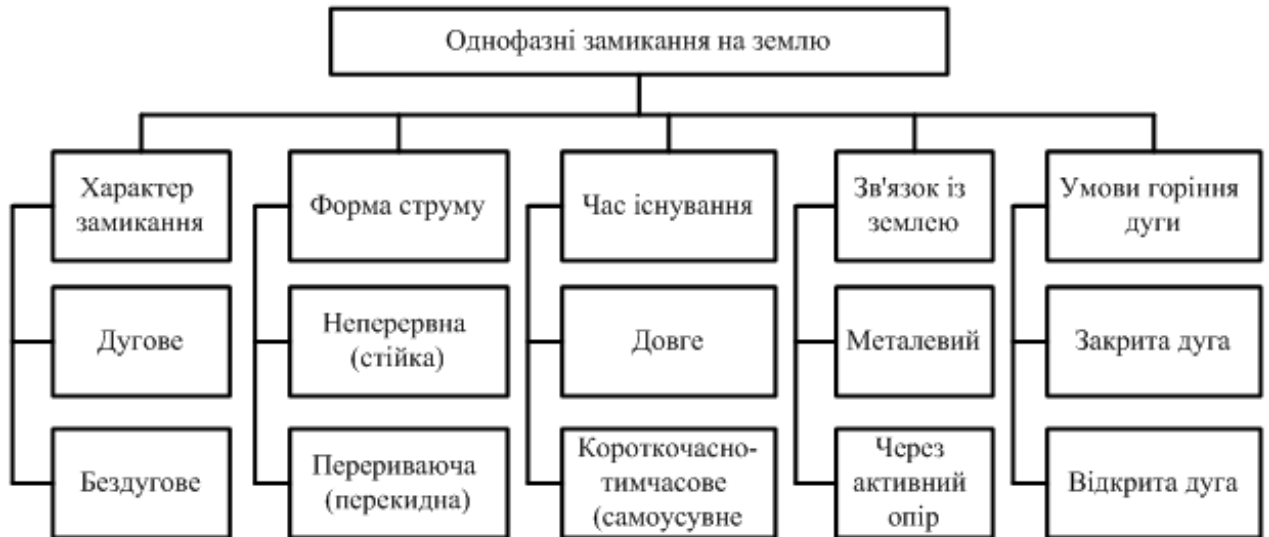


Рисунок 1.1 – Характеристика однофазного замикання на землю

Однофазні замикання на землю при роботі джерел живлення як кабельних так й повітряних ліній мають специфічний прояв, що характеризується відповідними осцилограмами струму при виникненні ушкоджень.

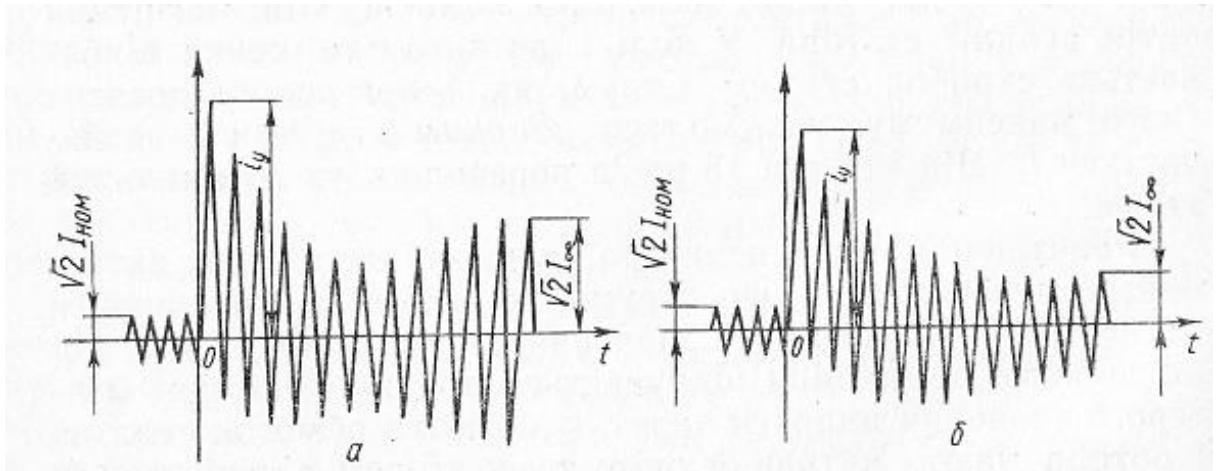


Рисунок 1.2 – Форма струмів при однофазному замиканні на землю (а)
та при застосуванні опору (б)

При цьому також слід дослідити характер розподілу струму при виникненні електричної дуги.

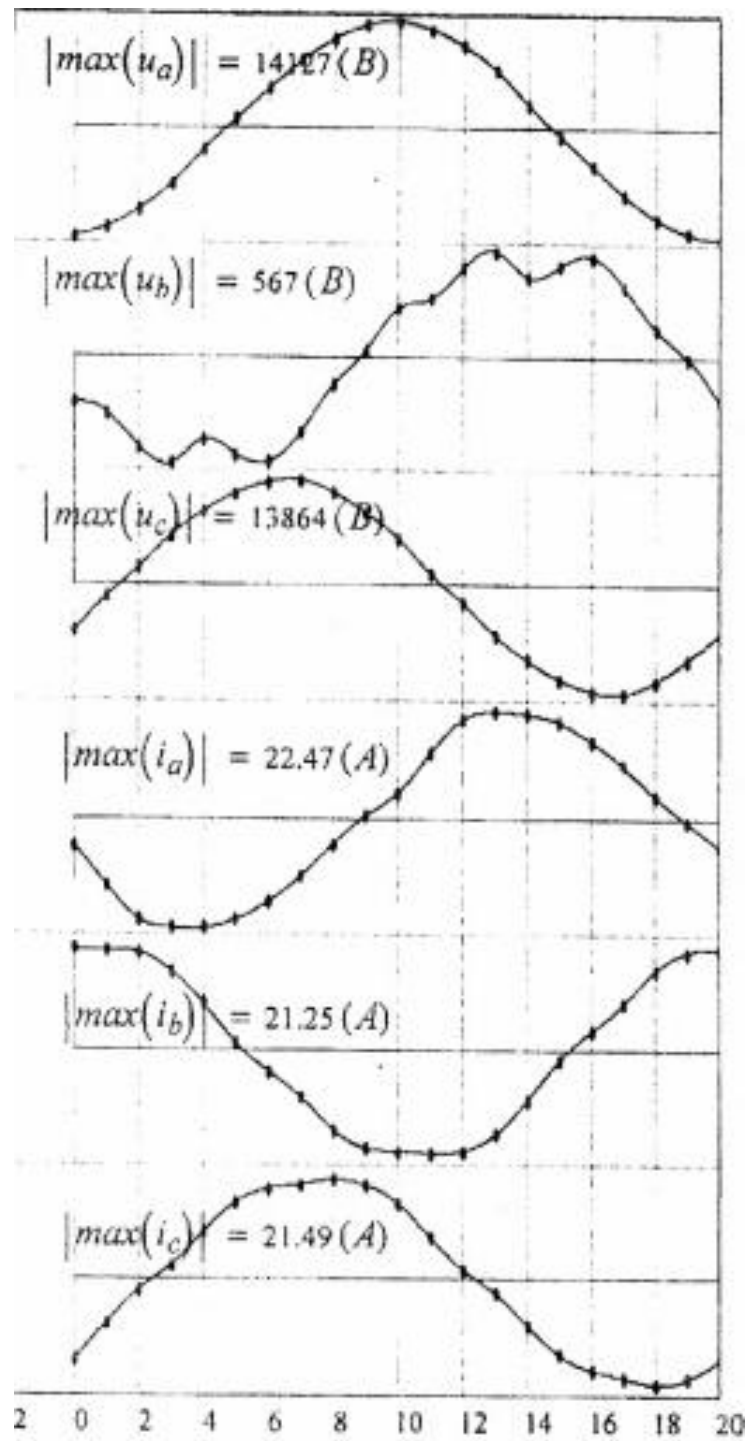


Рисунок 1.3 – Форма струмів при однофазному замиканні на землю:

а) у повітрі; б) у ізоляції; в) у кабелі

Розглянемо більш детально форму струму та напруги при виникненні короткого замикання.

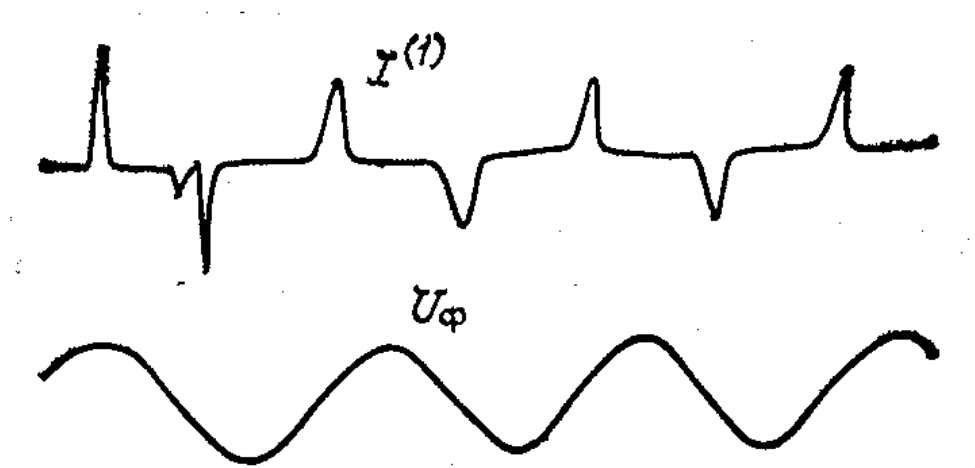


Рисунок 1.4 – Форма струмів при однофазному замиканні на землю при розтягуванні дуги

1.3. Стійкість однофазного замикання на землю

Стійкість електричної системи багато у чому залежатиме від стійкості та потужності джерела живлення.

При цьому у схемі розрахунку має враховуватись як індуктивні опори джерела та навантаження, так й ємнісне значення лінії мережі живлення відповідно до навантаження.

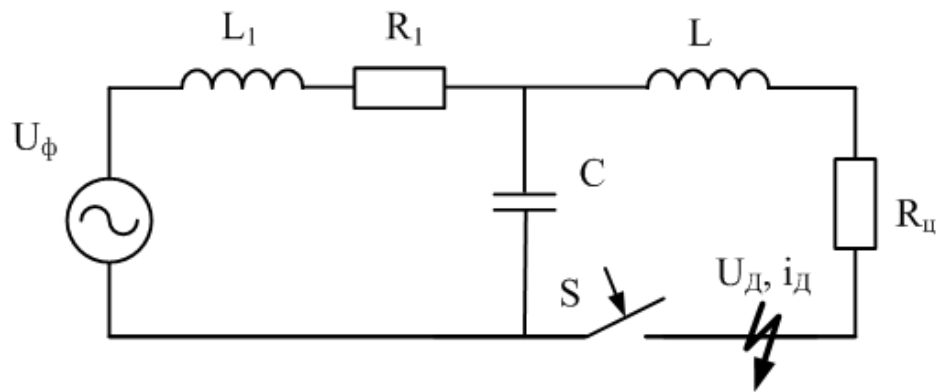


Рисунок 1.5 – Схема для аналізу стійкості однофазного замикання на землю

Розглянемо перехідні процеси у визначеному контурі системи електропостачання.

$$p^2 + p \left(\frac{R_{ц}}{L} + \frac{U_{д}}{i_{д}} \frac{1}{L} \right) + \frac{1}{LC} = 0 \quad (1.1)$$

Тоді отримаємо:

$$U_0 i_{\Delta} + I_0 u_{\Delta} = U_0 \theta \frac{di_{\Delta}}{dt} - I_0 \theta \frac{du_{\Delta}}{dt} \quad (1.2)$$

де I_0, U_0 — сталий струм і напруга;

i_{Δ}, u_{Δ} — миттєвий струм і напруга;

$\theta = Q_0 / P_0$ — стала часу;

Q_0 — тепломісткість;

P_0 — потужність.

Переведемо у зручний формат

$$U_0 i_{\Delta} + I_0 u_{\Delta} = U_0 \theta p i_{\Delta} - I_0 \theta p u_{\Delta} \quad (1.3)$$

Тепер

$$i_{\Delta} = \frac{U_{\Delta}(\theta p + 1)}{R_{CT}(\theta p - 1)} \quad (1.4)$$

де R_{cm} — опір.

Тоді

$$p^3 + p^2 \left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_{\Pi}}{L} + \frac{R_{CT}}{L} \right) + p \left(\frac{R_{\Pi}}{L\theta} + \frac{1}{LC} - \frac{R_{CT}}{L\theta} \right) + \frac{1}{LC\theta} = 0 \quad (1.5)$$

Система рівнянь

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad (1.6)$$

Отже

$$\Delta 1 = a_1 > 0; \Delta 2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$$

$$\Delta 2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 \begin{vmatrix} a_2 & 0 \\ a_1 & a_2 \end{vmatrix} - a_3 \begin{vmatrix} a_0 & 0 \\ 0 & a_3 \end{vmatrix} = \Delta 2 a_3 > 0.$$

Тоді визначники

$$\Delta 1 = \frac{1}{\theta} + \frac{R_{\Pi}}{L} + \frac{R_{CT}}{L} > 0 \quad (1.7)$$

$$\Delta 2 = \left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_{\Pi}}{L} + \frac{R_{CT}}{L} \right) \left(\frac{R_{\Pi}}{L\theta} + \frac{1}{LC} - \frac{R_{CT}}{L\theta} \right) - \frac{1}{LC\theta} > 0 \quad (1.8)$$

$$\Delta 3 = \frac{1}{LC\theta} > 0 \quad (1.9)$$

Складемо узагальнюючу функцію

$$\frac{R_{\text{ц}}}{\theta} + 200R_{\text{ц}}^2 + 6,6 * 10^7 \theta + 6,6 * 10^7 R_{\text{ц}} \theta > \frac{R_{\text{кр}}}{\theta} + \frac{R_{\text{кр}}^2}{\theta} \quad (1.10)$$

1.4. Параметри та електричні величини при однофазному замиканні на землю

Складемо характеристичне рівняння відповідно до схеми заміщення аварійного режиму.

$$Z_{\kappa}^I = Z_x + Z_{\kappa} + \frac{Z_x Z_{\kappa}}{Z_{\kappa}}; \quad Z_{\kappa}^{II} = Z_x + Z_{\kappa} + \frac{Z_x Z_{\kappa}}{Z_{\kappa}},$$

$$Z_{\kappa}^{III} = Z_x + Z_{\kappa} + \frac{Z_x Z_{\kappa}}{Z_{\kappa}}$$

де Z_x — повний опір навантаження лінії.

Скористаємось однією із запропонованих схем електричних приєднань обладнання.

Для більш зручного представлення пропонується надати можливі варіанти у відповідності до встановлених обмежень щодо типу та параметрів навантаження.

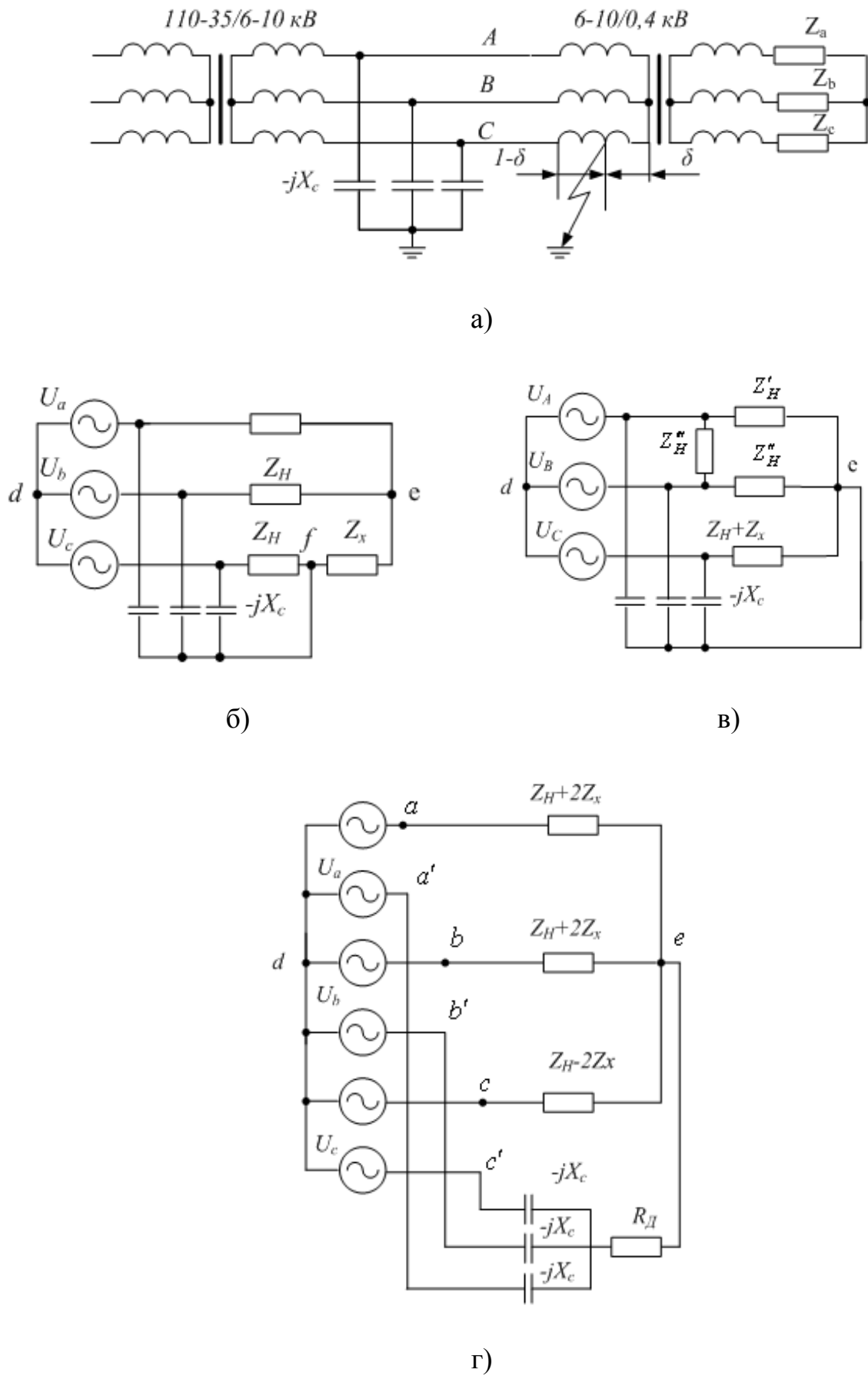


Рисунок 1.6 – Схеми для аналізу параметрів та електричних величин

при однофазному замиканні на землю:

а – робоча; б – заміщення; в – еквівалентна; г – при застосуванні опору.

Спряmlена напруга

$$U_{ae} = \frac{U \left(\frac{1}{Z_H} - \frac{1}{jX_C} \right) + a^2 U \left(\frac{1}{Z_H} - \frac{1}{jX_C} \right) + a U \left(\frac{1}{Z_H - Z_X} - \frac{1}{jX_C} \right)}{\frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_H + Z_H} - \frac{3}{jX_C}} \quad (1.11)$$

Перетворимо вираз

$$\underline{U}_{ae} = \frac{a U \left(\frac{1}{Z_H - Z_X} - \frac{1}{Z_H - 2Z_X} \right)}{\frac{1}{Z_H + 2Z_X} + \frac{1}{Z_H - Z_X} - \frac{3}{jX_C}} \quad (1.12)$$

Розглянемо коефіцієнти

$$K_1 = \frac{3\alpha}{1 - \alpha + 2\alpha^2}, \quad K_2 = \frac{3}{1 + \alpha - 2\alpha^2}$$

Тоді загальне значення

$$\underline{U}_{ae} = \frac{a U (G - jB) K_1}{K_2 (G - jB) + 3jb} \quad (1.13)$$

Гармонійні складові представлених коефіцієнтів можна виразити наступним чином:

$$\beta = \left(-\frac{B}{G}\right) - \operatorname{arctg} \frac{K_2 B - 3b}{K_2 j} \quad (1.14)$$

У навантаженні:

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= \left(\frac{1}{Z_H + 2Z_x} + \frac{1}{Z_H + 2Z_x} + \frac{1}{Z_H - Z_x} + \frac{1}{R_H} \right) - U_C \frac{1}{R_H} = \\ &= U \frac{1}{Z_H + 2Z_x} + a^2 U \frac{1}{Z_H + 2Z_x} + aU \frac{1}{Z_H - Z_x} \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_C &= \left(\frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{R_H} \right) - U_C \frac{1}{R_H} = \\ &= U \frac{1}{-jX_c} + a^2 U \frac{1}{-jX_c} + aU \frac{1}{-jX_c} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Тоді для напруги:

$$\underline{U}_0 = \frac{aU(G - jB)K_1}{K_2(G + 3R_H Bb) + j(3K_2 R_H Gb + 3b - K_2 B)} \quad (1.17)$$

Остаточно:

$$U_{oc} = \frac{aU(3R_H Bb + G) - K_1 B + j(K_2 3R_H Gb + 3b - K_2 B + K_1 B)}{K_2(G + 3R_H Bb) + j(K_2 3R_H Gb + 3b - K_2 B)} \quad (1.18)$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{K_2(3R_{\pi}Gb - B) + K_1B}{K_2(3R_{\pi}Bb + G) - K_1G} - \operatorname{arctg} \frac{K_2(3R_{\pi}Gb - B)}{K_2(3R_{\pi}Gb + G)} \quad (1.19)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(-\frac{B}{G} \right) - \operatorname{arctg} \frac{K_2(3R_{\pi}Gb - B) + 3B}{K_2(3R_{\pi}Bb + G)} \quad (1.20)$$

Відповідний кут:

$$\varphi = \varphi_1 - (-\beta) \quad (1.21)$$

Представимо графічні зображення наведених виразів для розрахунків системи.

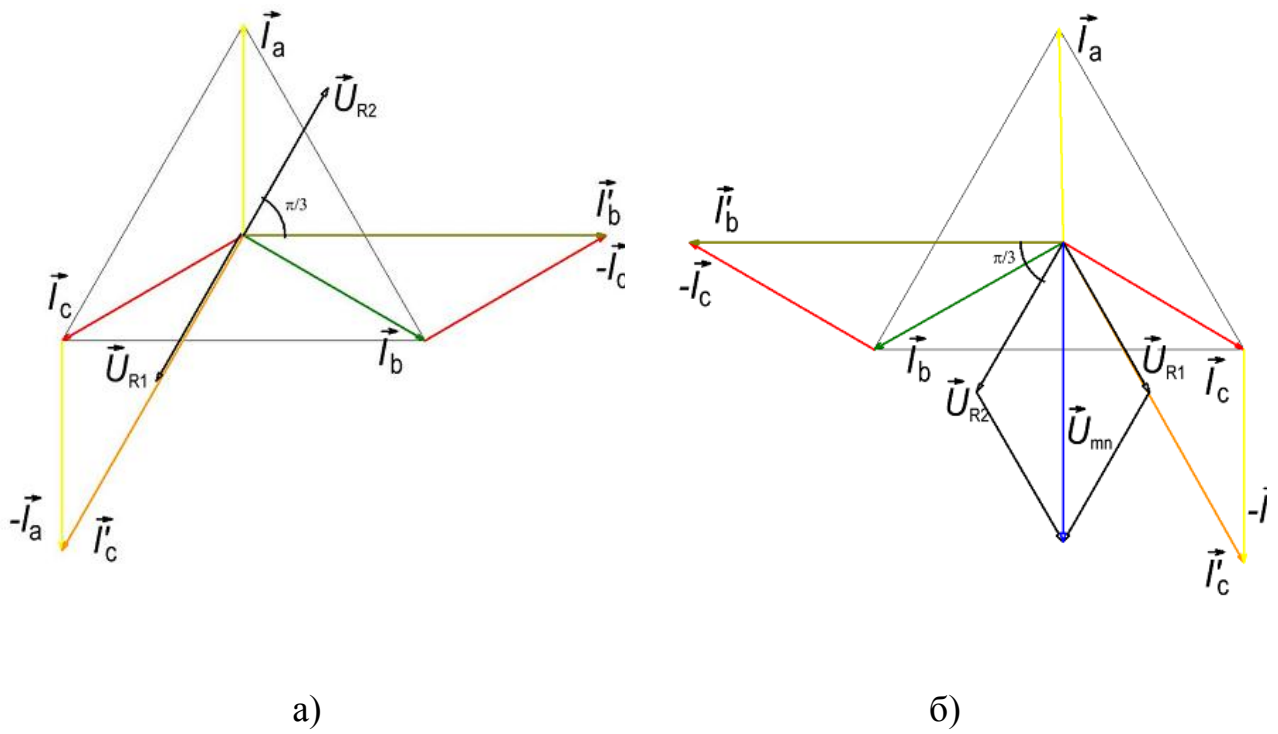


Рисунок 1.7 – Векторна діаграма напруги та струму при однофазному замиканні на землю в мережі живлення (а) та з боку споживача (б)

1.5. Методи визначення характеристик при однофазному замиканні на землю у мережі живлення

Розглянемо можливості точного визначення параметрів мережі живлення при виникненні однофазного замикання на землю за наступними виразами.

$$i_n = i_{n-1} e^{(-R_u/2L)t} ; \quad U_n = U_{n-1} e^{(-R_u/2L)t} \quad (1.22)$$

Тоді із врахуванням:

$$\bar{n}/m = -6,507 + 0,031\tilde{T} , \quad (1.23)$$

де \bar{n}/m — середні значення;

\tilde{T} — середньомісячне значення температури повітря, С°.

Представимо наведені розрахункові вирази у вигляді характеристичних графіків.

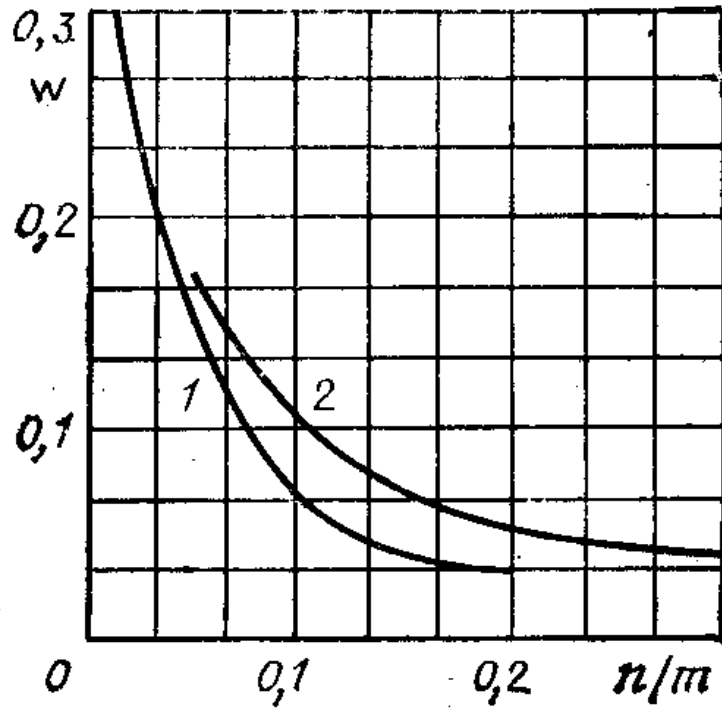


Рисунок 1.8 – Розподіл характеристик при однофазному замиканні на землю у мережі живлення напругою 6 кВ без впливу навколишнього середовища (1) при насичені навколишнього середовища атмосферними осадками (2):

ω – частота; n – кількість замикань; m – кількість споживачів.

Висновки по розділу

Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю є важливим питанням для функціонування розподільчих електричних мережах, особливо тих у яких напруга живлення є вищою за 1000 В.

Надійність роботи системи електропостачання тісно перетинається із питанням спрацьовування захисту.

Одним з поширених методів захисту електричної мережі є метод захисного відключення.

При цьому втрачається можливість роботи з діючим електричним навантаженням.

Таким чином необхідним є можливість приєднання до резервного джерела живлення, що забезпечить безперебійність роботи мережі живлення у цілому.

Також слід зазначити, що одним з проявів послідовного убезпечення роботи обладнання станцій та підстанцій є можливість застосовувати своєчасне захисне шунтування пошкодженої ділянки мережі живлення при виникненні короткого замикання.

Дослідження що вказують на швидкоплинний характер розповсюдження аварійних струмів у мережі при виникненні коротких замикань свідчать про необхідність швидкого виявлення подібних процесів у мережі живлення для своєчасного припинення їх шкідливої дії на стан та роботу обладнання.

Необхідною умовою для формування алгоритмів відпрацьовування системи захисту обладнання станцій та підстанцій є розрахунок струмів щодо

визначення характеру протікання процесів у розподільчій мережі відносно навантаження.

Розрахунок струмів є необхідною умовою для визначення характеру аварійного режиму.

Розділ 2. Дослідження методів визначення процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В

2.1. Теоретичні розрахунки зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю

Розглянемо можливості щодо швидкого припинення розвитку аварійної ситуації при виникненні однофазного замикання на землю у мережі живлення при пошкодженні.

Одним з методів поліпшення швидкодії роботи захисного обладнання є метод захисного шунтування пошкодженої ділянки електричної мережі за допомогою штучних контурів.

При цьому слід уникати помилкового включення або ввімкнення стабілізуючого контуру.

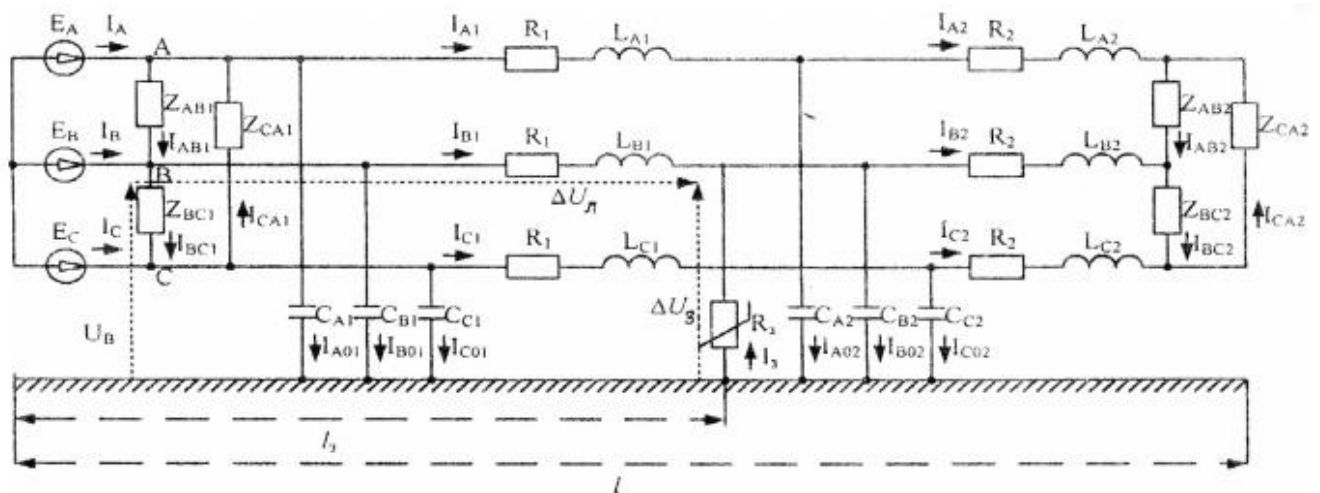


Рисунок 2.1 – Схема для визначення зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю

На практиці зручно застосовувати розрахунок у вигляді коефіцієнту шунтового опору.

$$K_{э,ш} = 1 - \frac{\sum I_{ш}^{(1)}}{I^{(1)}} \quad (2.1)$$

де $I^{(1)}$ — струм однофазного замикання на землю.

2.2. Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю

Складемо характеристичне рівняння контуру шунтового заземлення пошкодженої ділянки мережі.

$$R_{нА} + \frac{R_{нВ}R_{нС}}{R_{нВ} + R_{нС}}, \quad jX_{нА} + \frac{jX_{нВ}jX_{нС}}{jX_{нВ} + jX_{нС}}$$

Тоді

$$\frac{R_B R_C}{R_B + R_C}, \quad \frac{jX_B jX_C}{jX_B + jX_C}$$

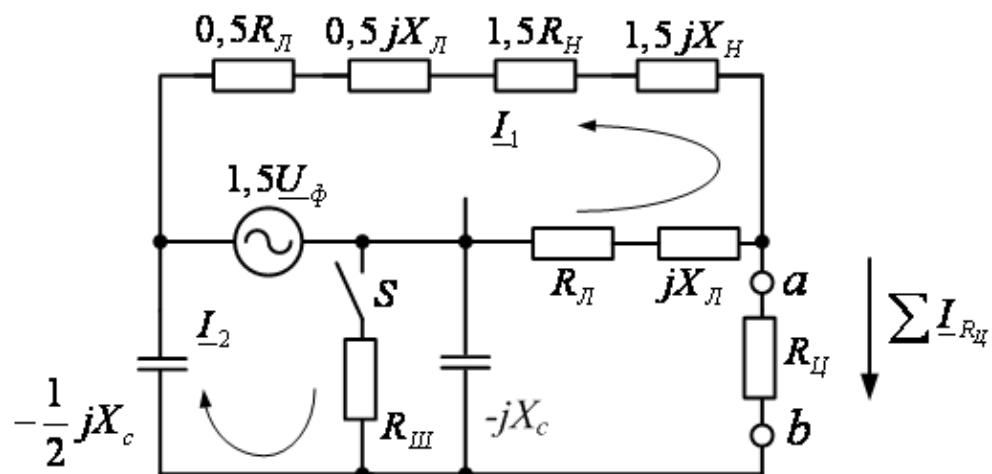


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема для визначення зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю

При симетричному розподілі навантажень можна записати наступні рівняння:

$$U_{ab} = \varphi_a + \varphi_b$$

$$\varphi_a = I_1(R_n + jX_n) = \frac{U_\phi(R_n + jX_n)}{(R_n + R_n) + j(X_n + X_n)} \quad (2.2)$$

$$\varphi_b = I_2 \frac{-R_{ш}jX_c}{R_{ш} - jX_c} = \frac{U_\phi}{1 - jX_c / 3R_{ш}} \quad (2.2a)$$

де φ_a, φ_b — потенціал у точках,

I_1, I_2 — струми.

Отже

$$U_{ab} = U_\phi \left[\frac{R_n + jX_n}{(R_n + R_n) + j\omega(L_n + L_n)} - \frac{1}{1 - jX_c / 3R_{ш}} \right] \quad (2.3)$$

Для реактивної складової:

$$U_{ab} = U_\phi \left[\frac{R_n + j\omega L_n}{(R_n + R_n) + j\omega(L_n + L_n)} - \frac{3R_{ш}j\omega C}{3R_{ш}j\omega C + 1} \right] \quad (2.4)$$

Тоді

$$U_{\phi} \frac{R_n + j\omega L_n}{(R_n + R_n) + j\omega(L_n + L_n)} = U_{\delta}, \quad (2.5a)$$

$$U_{\phi} \frac{3R_w j\omega C}{3R_w j\omega C + 1} = U_{зал} \quad (2.5б)$$

$$U_{\phi} = \sum U_w \quad (2.5в)$$

ЕРС ділянки утворення шунтового контуру:

$$\sum I_{R_y} = I_{\delta} + I_{зал} = \frac{U_{\delta}}{z_{ex} + R_y} + \frac{U_{зал}}{z_{ex} + R_y}, \quad (2.6)$$

Де

$$z_{ex} = \frac{R_w}{1 + 3j\omega C R_w} + \frac{(R_3 + j\omega L_3)(R_n + j\omega L_n)}{(R_3 + R_n) + j\omega(L_3 + L_n)}; \quad (2.7)$$

$$R_3 = 0,5R_n + 1,5R_n, \quad L_3 = 0,5L_n + 1,5L_n, 1,5L_n,$$

2.3. Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у ненавантаженої лінії

Розглянемо вираз для розрахунку струму короткого замикання пошкодженої ділянки мережі живлення при ненавантаженої лінії електропередач.

$$\underline{I}^{(1)} = U_{\phi} Y_{\psi} \frac{Y_B(1-a^2) + Y_C(1-a)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{\psi}}, \quad (2.8)$$

де Y_A, Y_B, Y_C , - комплексні провідності;

Y - провідність у лінії.

Якщо врахувати симетричність навантаження:

$$\underline{I}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{R_{\psi} - \frac{1}{3}jX_c}, \quad (2.9)$$

Отже еквівалент діючого значення струму:

$$\underline{I}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{R_{\psi}R_w}{R_{\psi} + R_w} - \frac{1}{3}jX_c} \quad (2.10)$$

Представимо схеми для трифазних розрахунків мережі з використанням наведених функцій.

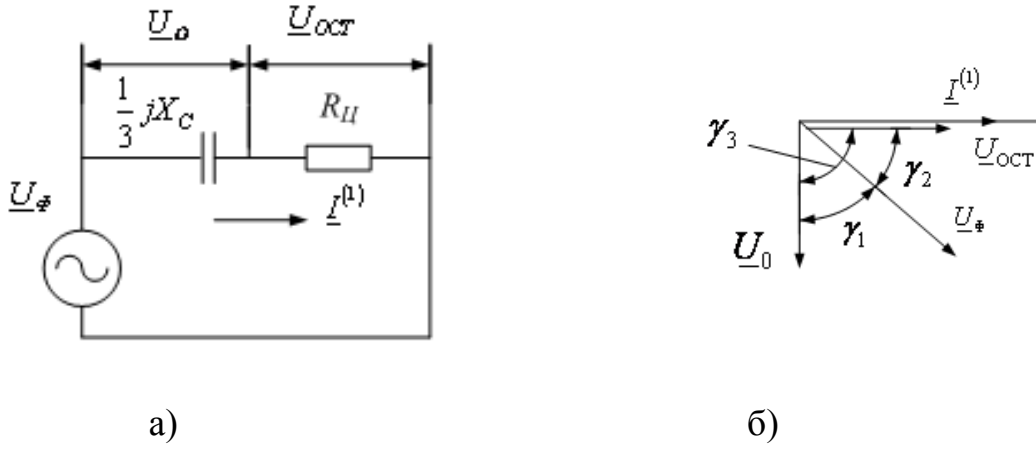


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема (а) та векторна діаграма напруги та струму (б) при однофазному замиканні на землю

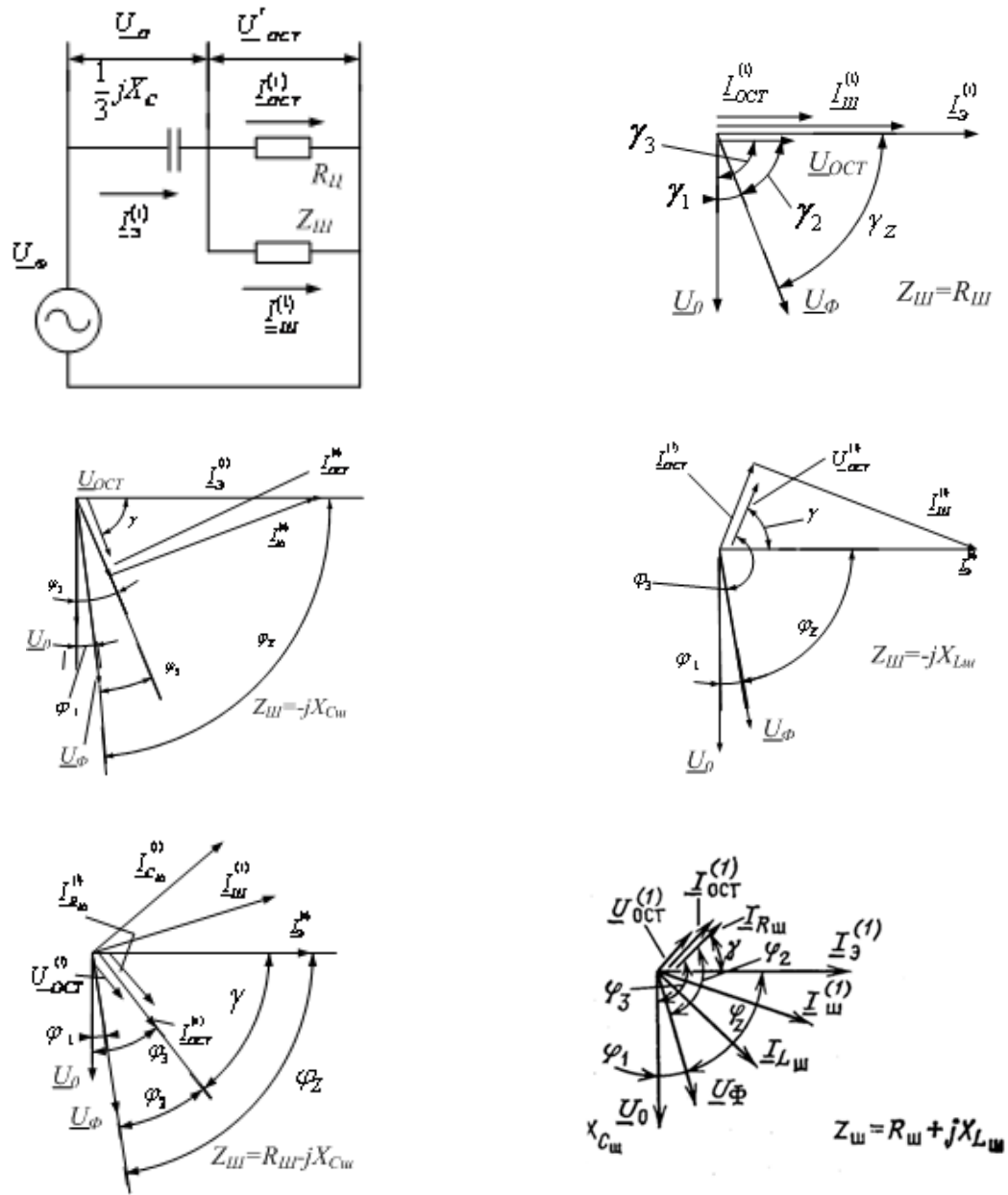


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема та векторні діаграми напруги та струму при однофазному замиканні на землю

Розглянемо складові струму трифазної системи.

$$\underline{I}_{осм}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{R_{\psi}R_{\omega}}{R_{\psi} + R_{\omega}} - \frac{1}{3}jX_c} \frac{R_{\omega}}{R_{\psi} + R_{\omega}}, \quad (2.11)$$

$$\underline{I}_{\omega}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{R_{\psi}R_{\omega}}{R_{\psi} + R_{\omega}} - \frac{1}{3}jX_c} \frac{R_{\psi}}{R_{\psi} + R_{\omega}}. \quad (2.12)$$

Застосуємо

$$\frac{R_{\omega}}{R_{\psi} + R_{\omega}} = K, \quad \frac{R_{\psi}}{R_{\psi} + R_{\omega}} = KR_{\omega} \quad (2.13)$$

Тоді струм:

$$\underline{I}_{осм}^{(1)} = \frac{U_{\phi}K}{R_{\psi} - \frac{1}{3}jX_c} \quad (2.14)$$

$$\underline{I}_{\omega}^{(1)} = \frac{U_{\phi}K}{R_{\psi}K - \frac{1}{3}jX_c} \quad (2.15)$$

Для співвідношення маємо:

$$\frac{I^{(1)}}{\underline{I}_{\text{ном}}^{(1)}} = \sqrt{\frac{R_{\psi}^2 + \frac{X_c^2}{9K^2}}{R_{\psi}^2 + \frac{X_c^2}{9}}} \quad (2.16)$$

При виникненні зсуву будемо мати:

$$\underline{U}_0^I = \frac{\underline{U}_{\phi}}{KR_{\psi} - \frac{1}{3}jX_c} \left(-\frac{1}{3}jKc\right) \quad (2.17)$$

А отже

$$\underline{U}_{\text{ном}}^I = \frac{\underline{U}_{\phi}}{KR_{\psi} - \frac{1}{3}jX_c} KR_{\psi} \quad (2.18)$$

Закинемо рівняння системи для визначення складових струмів короткого замикання.

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \arctg \frac{KR_{\psi}}{\frac{X_c}{3}}; \\ \gamma_2 &= \arctg \frac{X_c}{3} \frac{1}{KR_{\psi}}; \\ \gamma_3 &= +\frac{\pi}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

У векторній формі

$$U_{\phi} = \sqrt{U_0^2 + U_{\text{зм}}^2} \quad (2.20)$$

Розрахуємо загальний опір представленої системи.

$$Z = -\frac{1}{3}jX_C - \frac{R_{\psi}jX_{C_{\psi}}}{R_{\psi} - jX_{C_{\psi}}} \quad (2.21)$$

Тоді кут гармонійного зсуву:

$$\varphi_Z = \arctg \frac{R_{\psi}^2 \left(\frac{1}{3}X_C + X_{C_{\psi}} \right) + X_{C_{\psi}}^2 X_C}{R_{\psi} X_{C_{\psi}} \left(X_{C_{\psi}} - \frac{2}{3}X_C \right)} \quad (2.22)$$

Замнемо виразом:

$$\frac{-jX_{C_{\psi}}}{R_{\psi} - jX_{C_{\psi}}} = K; \quad \frac{R_{\psi}}{R_{\psi} - jX_{C_{\psi}}} = -KjX_{C_{\psi}} \quad (2.13a)$$

Тоді

$$\gamma = \arctg -\frac{R_{\psi}}{X_{C_{\psi}}}$$

Загальний опір:

$$Z = -\frac{1}{3}jX_C + \frac{R_4 jX_{L_2}}{R_4 + jX_{L_2}} \quad (2.21a)$$

Загальна провідність:

$$\gamma_Z = \operatorname{arctg} \frac{R_4^2(X_{L_2} - \frac{1}{3}X_C) - X_{L_2}X_C}{R_4X_{L_2}(X_{L_2} + \frac{1}{3}X_C)} \quad (2.22a)$$

Тоді у комплексній формі:

$$\frac{jX_{L_2}}{R_4 + jX_{L_2}} = K; \quad \frac{R_4}{R_4 + jX_{L_2}} = KjX_{L_2} \quad (2.136)$$

2.4. Дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Розглянемо можливості щодо швидкого припинення розвитку аварійної ситуації при виникненні однофазного замикання на землю у мережі живлення при пошкодженні з роботою діючого обладнання при приєднанні споживачів електричного навантаження.

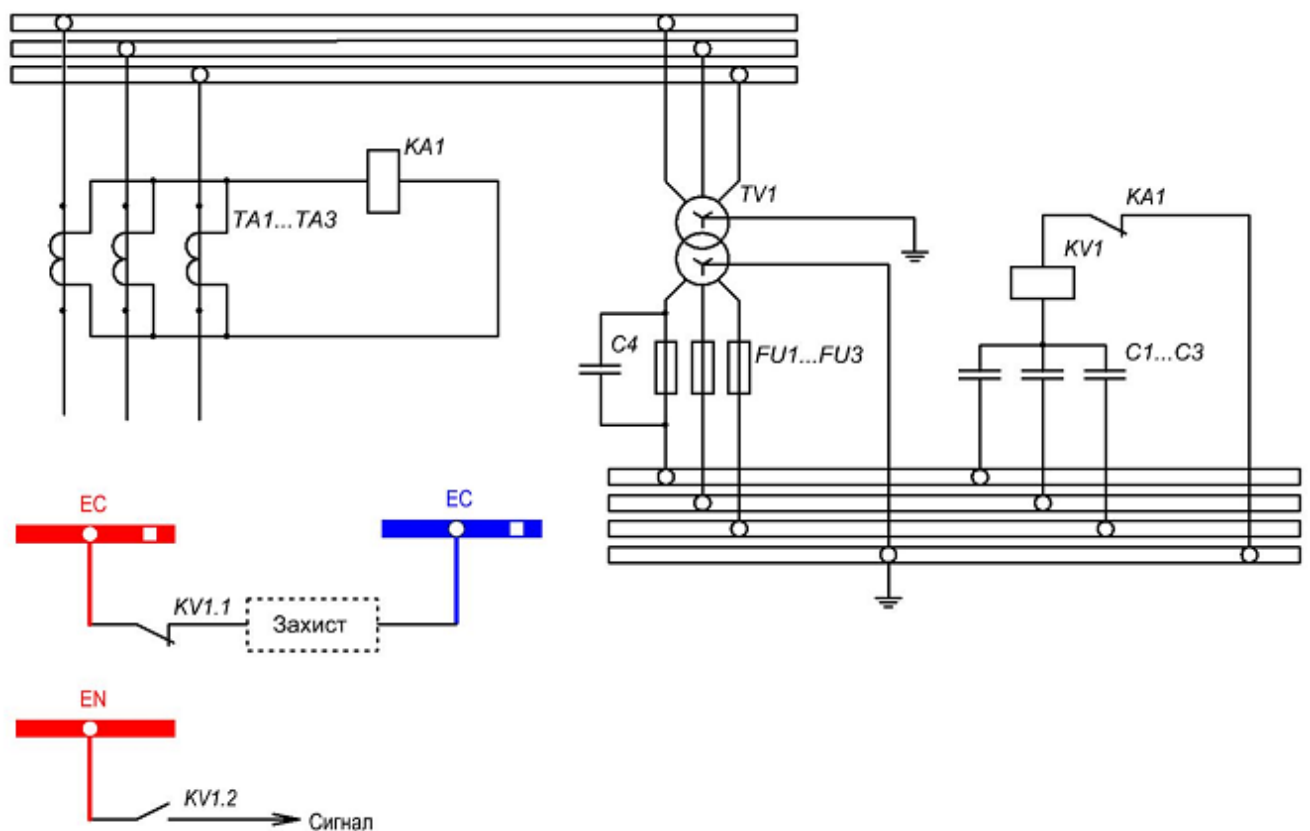


Рисунок 2.5 – Схема для розрахунку процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Розраховуємо індуктивне навантаження мережі.

$$X_{om} = X_I + X_{II} \quad (2.23)$$

де X_I, X_{II} — індуктивний опір.

Отже отримаємо рівняння виходячи зі струмів нульової послідовності навантаження.

$$X_{om} = X_I + X_{\mu\sigma}, \quad (2.24)$$

де $X_{\mu\sigma}$ — реактивний опір за (2.25)

де \underline{E}_Σ — ЕРС;

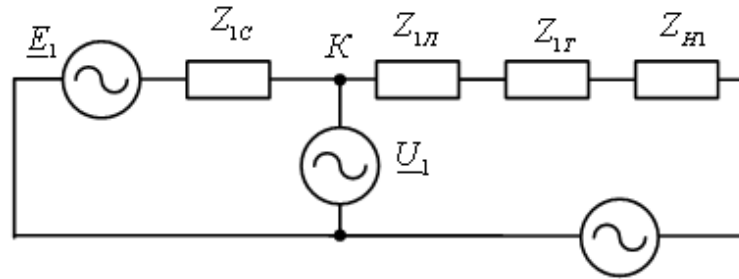
$R_{ш}$ — активний опір;

$R_{1\Sigma}, R_{2\Sigma}, R_{0\Sigma}, X_{1\Sigma}, X_{2\Sigma}, X_{0\Sigma}$ — активний та індуктивний опір.

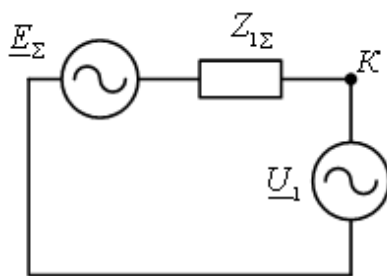
Тоді ЕРС контуру:

$$\underline{E}_\Sigma = \frac{\underline{E}_I (Z_{Ia} + Z_{Ib} + Z_{Ic})}{Z_{Ic} + Z_{Ia} + Z_{Ib} + Z_{Ic}}, \quad (2.26)$$

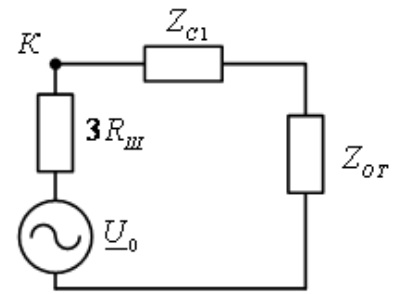
де $Z_{Ic}, Z_{Ia}, Z_{Ib}, Z_{Ic}$ — повний опір.



а)



б)



в)

Рисунок 2.6 – Розрахункова схема для мережі при зміні електричних величин при однофазному замиканні на землю:

а, б – пряма послідовність; в – нульова послідовність

Розглянемо послідовний характер введення відповідної індуктивності ділянки короткого замикання.

$$X_{1\Sigma} = \frac{X_1(X_{1R} + X_{1T} + X_{1N})}{X_{1c} + X_{1R} + X_{1T} + X_{1N}}; \quad (2.27)$$

$$R_{1\Sigma} = \frac{R_1(R_{1R} + R_{1T} + R_{1N})}{R_{1c} + R_{1R} + R_{1T} + R_{1N}}. \quad (2.28)$$

Отже

$$X_{0\Sigma} = X_{0n} + X_{1m}; \quad (2.29)$$

$$R_{0\Sigma} = R_{0n} + R_{1m}, \quad (2.30)$$

$$R_{1T} = U_{к,а} U_{ном} / S_T; \quad (2.31)$$

де $U_{к,а}$ — активна напруга;

$U_{ном}$ — номінальна напруга;

S_T — потужність.

Для живлячого трансформатору:

$$X_{0\Sigma} = X_{0n} + X_{1T} + X_{\mu 0}. \quad (2.32)$$

Тоді за представленими виразами отримаємо графіки розподілу електричного потенціалу уздовж пошкодженої ділянки мережі живлення при короткому замиканні.

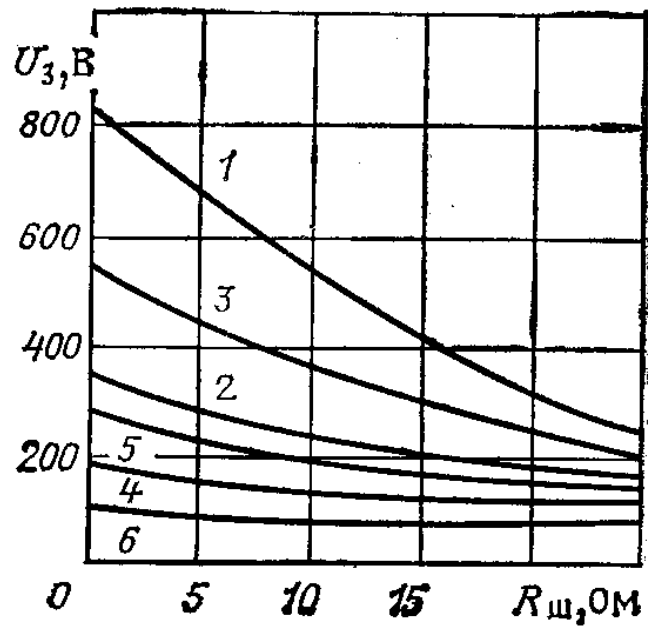


Рисунок 2.7 – Процес зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії: 1, 2 – трансформатори 630 кВА; 3, 4 – трансформатори 250 кВА; 5, 6 – трансформатори 160 кВА.

2.5. Дослідження ефективності методів визначення процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю

Розглянемо методи визначення ефективності захисного шунтування пошкодженої ділянки при короткому замиканні на землю відносно джерела живлення.

Представимо загальне рівняння у вигляді функції:

$$\underline{U}_{ed} = \frac{\frac{1}{2} jX_c \underline{U}}{3Z_n - jX_c}, \quad (2.33)$$

де Z_n — повний опір.

Тоді для кожної фази можна записати:

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_{ed} = \frac{U(3Z_n - \frac{3}{2}jX_c)}{3Z_n - jX_c}; \quad (2.34)$$

$$\underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_{ed} = \frac{U \left[a^2 (3Z_n - jX_c) - \frac{1}{2} jX_c \right]}{3Z_n - jX_c} \quad (2.35)$$

$$\underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_{ed} = \frac{U \left[a (3Z_n - jX_c) - \frac{1}{2} jX_c \right]}{3Z_n - jX_c} \quad (2.36)$$

Представимо схеми заміщення для розрахунку пошкодженої ділянки електричної мережі з боку споживача електричної потужності.

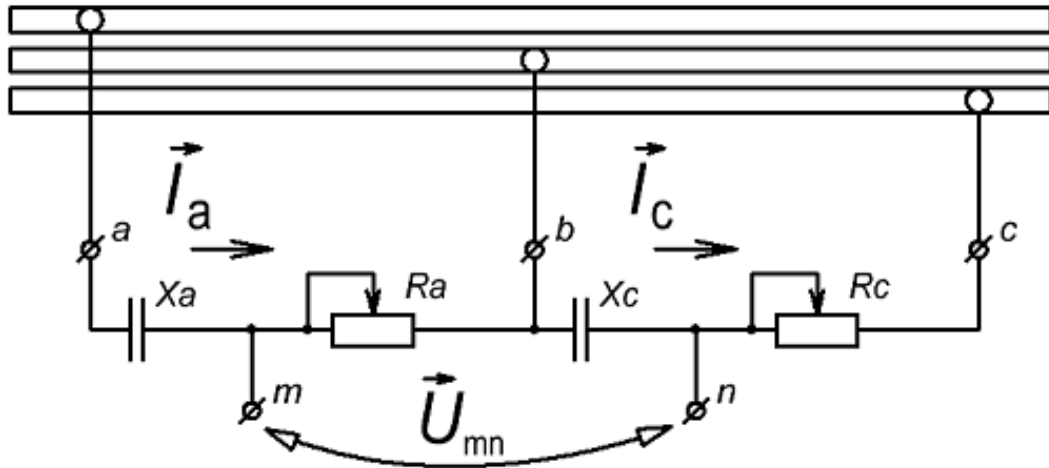


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема для визначення зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії:

а – мережа; б – схема заміщення; в – розрахункова схема.

Відповідно до схеми заміщення складемо векторну діаграму, що характеризуватиме перехідні процеси у пошкодженій ділянці електричної мережі.

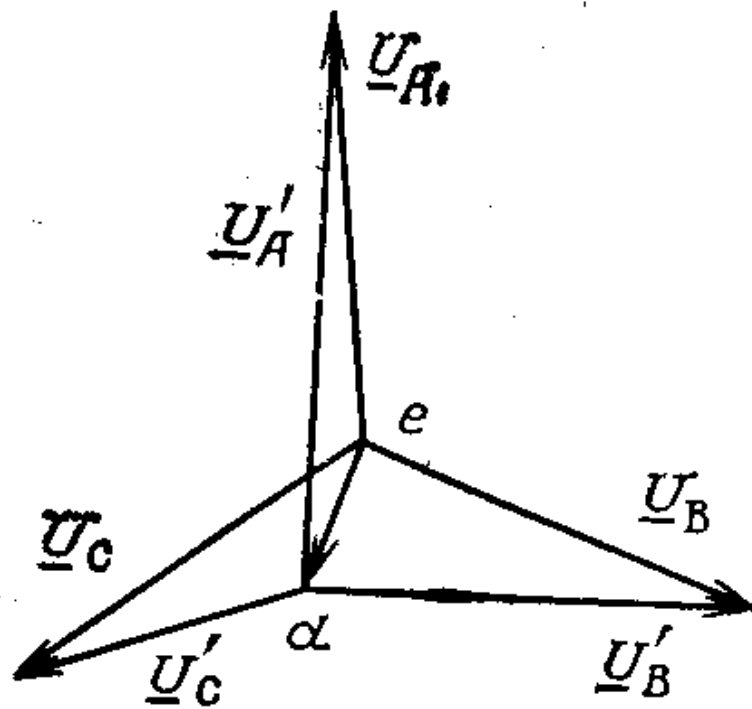


Рисунок 2.9 – Діаграми фазної напруг мережі живлення при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Представимо розраховані вирази у вигляді графіків відповідної ділянки навантаження.

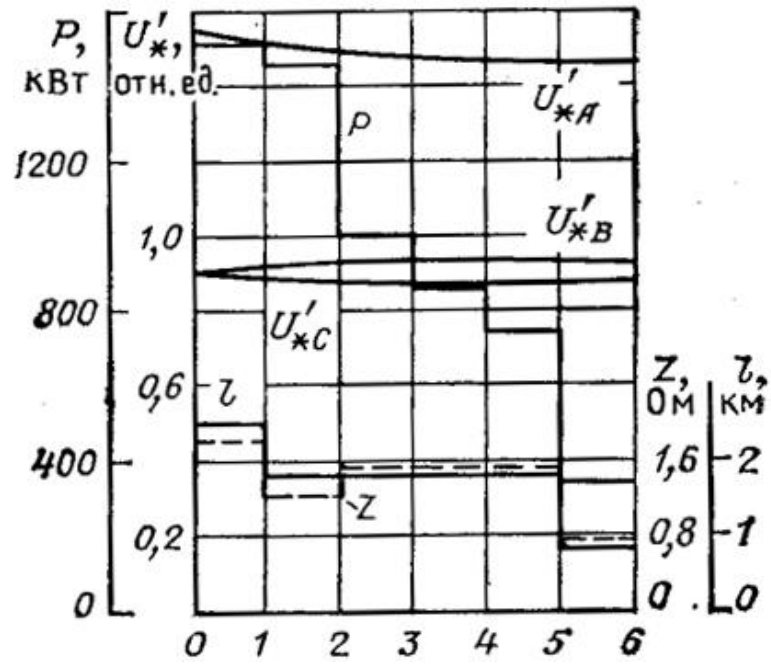


Рисунок 2.10 – Залежність фазної напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії: l – довжина лінії; Z – опір лінії; P – потужність лінії.

2.6. Дослідження процесу зниження напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Представимо розподіл втрат напруги живлення на магістральній ділянці мережі при застосуванні методу захисного шунтування при короткому замиканні.

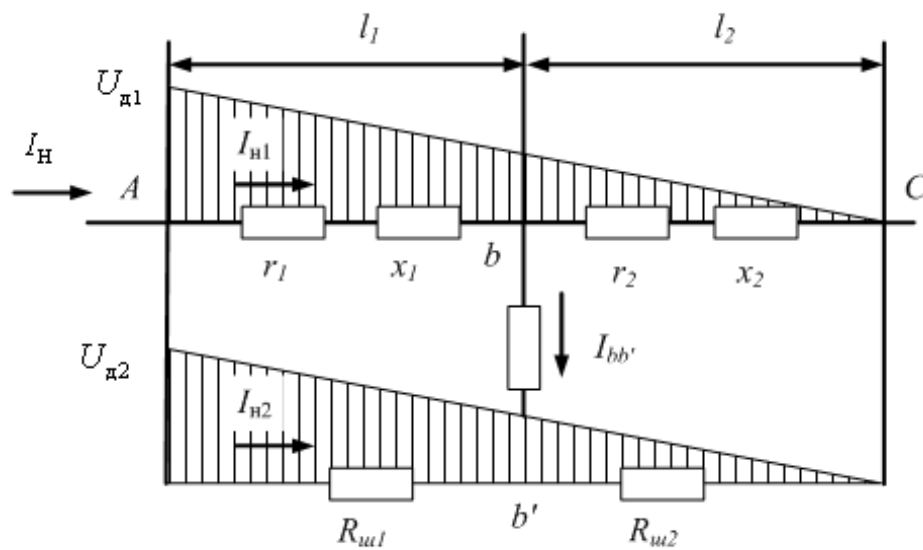


Рисунок 2.11 – Характеристика процесу зниження напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Тоді еквівалентний опір ділянки:

$$Z_3 = \frac{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} (R_{m1} + R_{m2})}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} + (R_{m1} + R_{m2})} \quad (2.37)$$

Відповідні рівняння струмів:

$$I_{H1} = \frac{I_H (R_{ш1} + R_{ш2})}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2 + (R_{ш1} + R_{ш2})}} \quad (2.38)$$

$$I_{H2} = \frac{I_H \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2 + (R_{ш1} + R_{ш2})}} ACV \quad (2.39)$$

А отже падіння напруги:

$$U_{\Delta\Delta} = \frac{I_H \left[(R_{ш1} + R_{ш2})(r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi) - R_{ш1} \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} \right]}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2 + (R_{ш1} + R_{ш2})}} \quad (2.40)$$

Представимо графічно наведені розрахунки падіння напруги при різній завантаженості лінії електропередач джерела живлення.

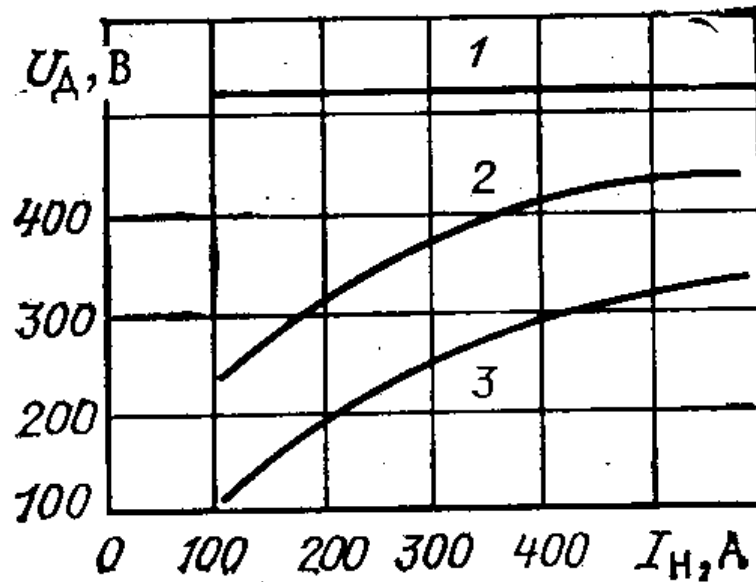


Рисунок 2.12 – Значення напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії: 1 – при опорі 0,5 Ом; 2, 3 – при опорі 4 та 1 Ом відповідно.

Розглянемо можливості компенсування втрат потужності у пошкодженій лінії електропередач при застосуванні захисного шунтування ділянки короткого замикання.

Одна з можливостей це уведення відповідного індуктивного опору у точці шунтування.

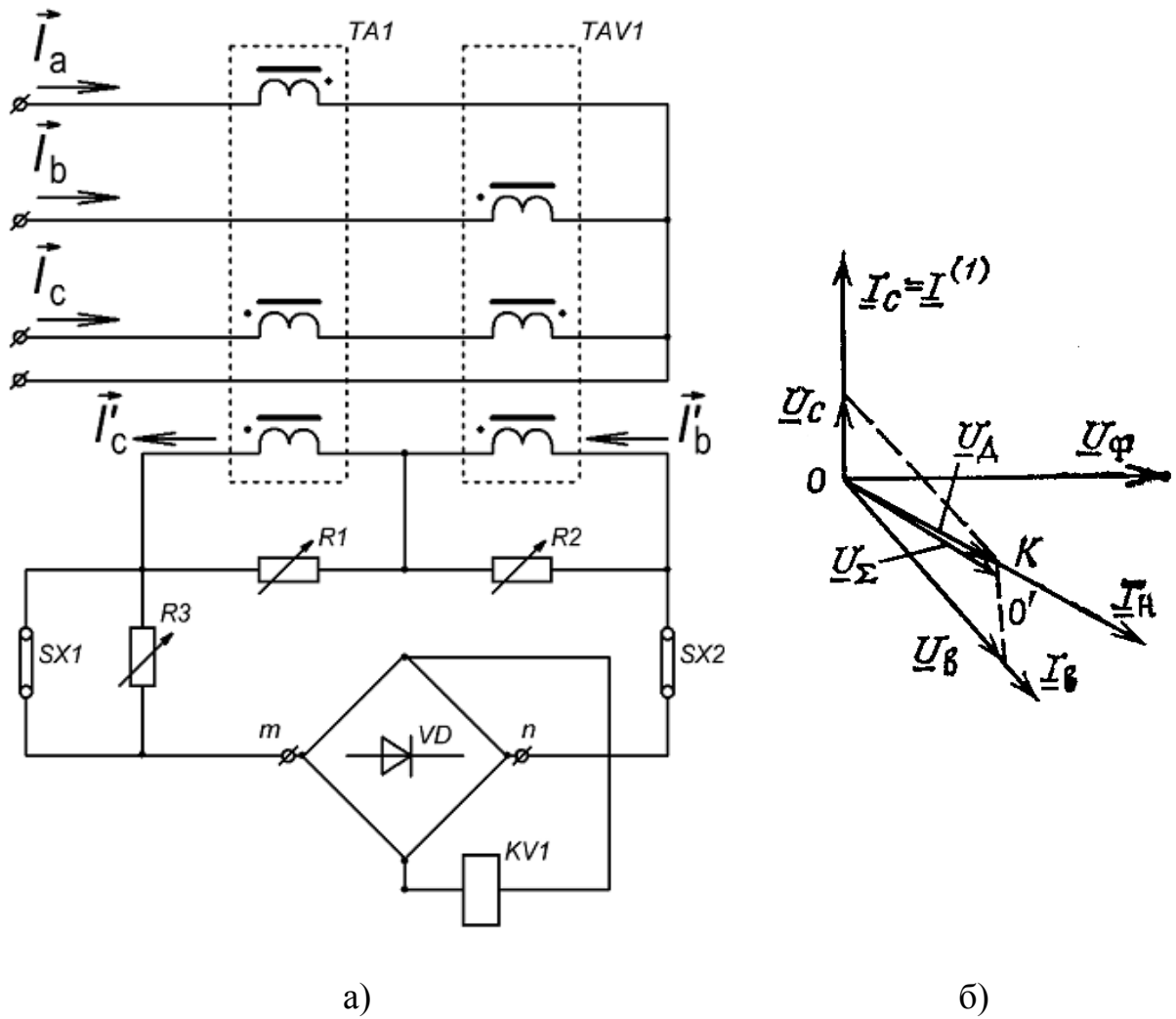


Рисунок 2.13 – Компенсація процесу зниження напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії:

а – принципова схема; б – векторні діаграми напруги.

Тоді напруга компенсації:

$$U_{c_{\text{кр}}} = aU - U_{\Delta} = \frac{aU}{\frac{C_{\text{ш}}}{3C} + 1}, \quad (2.41)$$

де U_{de} — різниця вузлових потенціалу.

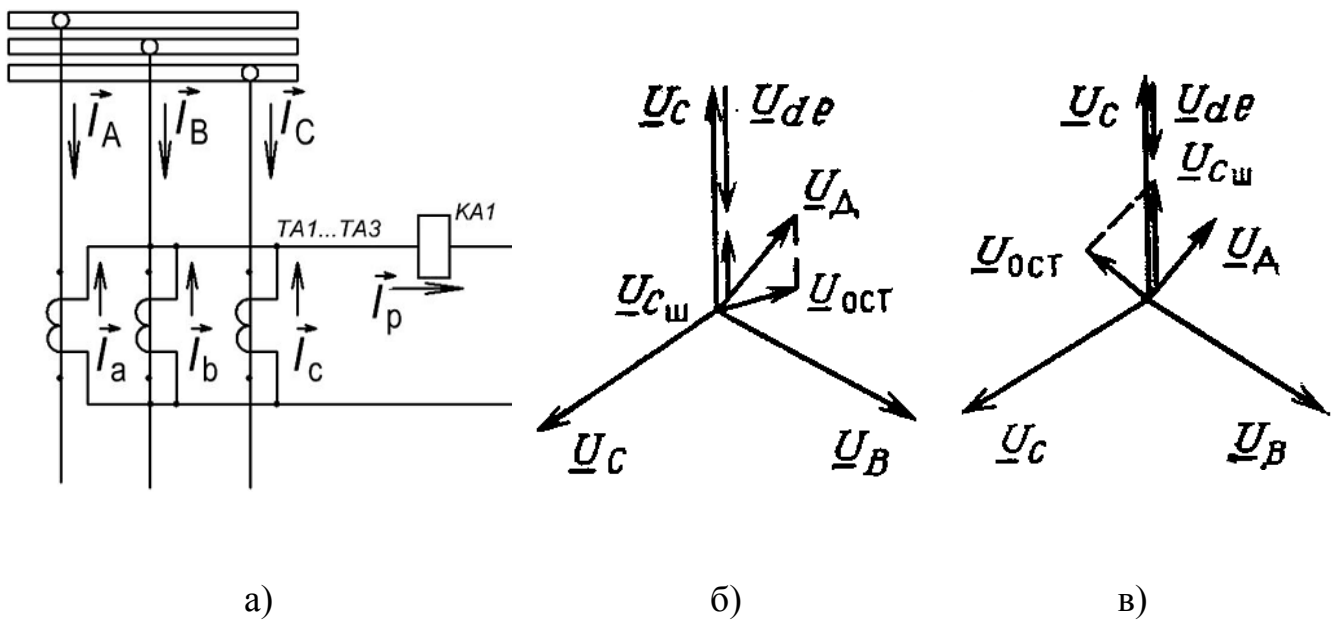


Рисунок 2.14 – Розрахунок процесу зниження напруги при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії:

а – схема; б – векторні діаграми напруги при $|\underline{U}_{c_2}| < |\underline{U}_d|$; в – векторні діаграми напруги при $|\underline{U}_{c_2}| > |\underline{U}_d|$.

Розглянемо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ост} &= \underline{U}_{c_2} - \underline{U}_d \text{ при } |\underline{U}_{c_2}| > |\underline{U}_d| \\ \underline{U}_{ост} &= \underline{U}_d - \underline{U}_{c_2} \text{ при } |\underline{U}_{c_2}| < |\underline{U}_d| \end{aligned} \right\} \text{или} \quad (2.42)$$

З отриманої системи рівнянь можна визначити необхідне значення

індуктивного опору для можливості компенсації ємнісної складової струму короткого замикання.

Отримані значення очікуються на рівні 0,15—0,6 Уд.

2.7. Дослідження стану ізоляції при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Розглянемо струмові рівняння для визначення впливу режиму короткого замикання на цілісність та стійкість ізоляції пошкодженої ділянки кабельної лінії.

$$\underline{I}_L = \frac{3\underline{U}_\Phi}{3R_{CT} - jX_C} \quad (2.43)$$

$$\underline{I}_{д.ш}^{(1)} = \frac{3\underline{U}_\Phi}{3R_{CT} - jX_C \left(\frac{R_{CT}}{R_{ш}} + 1 \right)} \quad (2.44)$$

де R_{CT} — опір.

Представимо схему заміщення для розрахунку пошкодженої ділянки кабельної лінії.

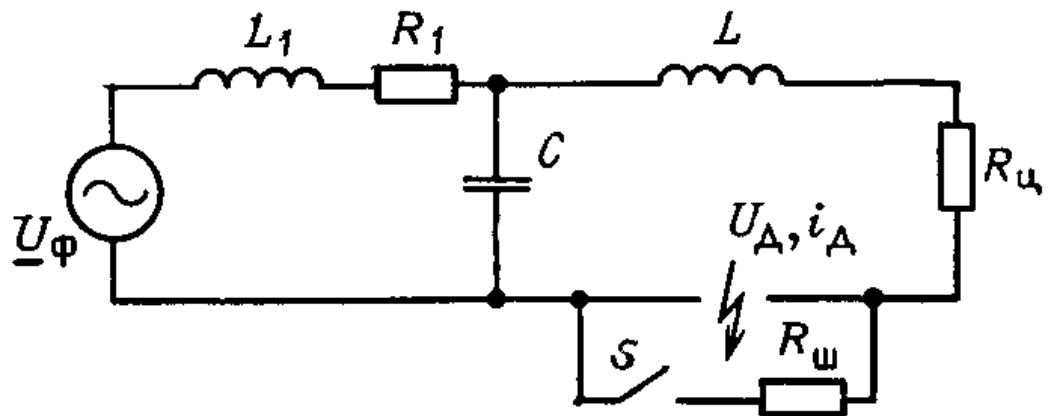


Рисунок 2.15 – Розрахункова схема для визначення стану ізоляції при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Запишемо рівняння контуру:

$$pL + \frac{1}{pC} + R_u + \frac{(u_D/i_D)R_w}{(u_D/i_D) + R_w} = 0 \quad (2.44)$$

Тоді

$$p^3 - p^2 \left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_w}{R_{cr}\theta} + \frac{R_u}{L} + \frac{R_w}{L} \right) + p \left(\frac{1}{LC} - \frac{R_u}{L\theta} + \frac{R_u R_w}{LR_{cr}\theta} - \frac{R_w}{L\theta} \right) + \left(\frac{R_w}{CLR_{cr}\theta} - \frac{1}{CL\theta} \right) = 0 \quad (2.45)$$

Для перехідного режиму:

$$\frac{1}{\theta} + \frac{R_{ш}}{R_{ст}\theta} + \frac{R_{ц}}{L} + \frac{R_{ш}}{L} = 0 \quad (2.46)$$

$$\left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_{ш}}{R_{ст}\theta} + \frac{R_{ц}}{L} + \frac{R_{ш}}{L}\right) \left(\frac{1}{LC} - \frac{R_{ц}}{L\theta} + \frac{R_{ц}R_{ш}}{LR_{ст}\theta}\right) - \left(\frac{R_{ш}}{CLR_{ст}\theta} - \frac{1}{CL\theta}\right) > 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{R_{ш}}{CLR_{ст}} - \frac{1}{CL\theta} > 0 \quad (2.48)$$

Розрахувавши отримаємо рівняння стійкості ізоляції пошкодженої ділянки кабельної лінії:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \text{ (процес є стійким)} \\ \frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \text{ (процес є нестійким)} \end{array} \right\} \quad (2.49)$$

Тоді значення допустимого опору шунтування:

$$R_{ш} \leq \frac{X_c U_{\text{EP}}}{3} \sqrt{\frac{\left. \begin{array}{l} \frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \text{ (процес є стійким)} \\ \frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \text{ (процес є нестійким)} \end{array} \right\}}{U_{\#}^2 - U_{\text{EP}}^2}} \quad (2.50)$$

2.8. Заходи забезпечення безпеки при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії

Розглянемо процеси при здійсненні захисного шунтування пошкодженої ділянки з огляду безпечності знаходження людини поряд з місцем ушкодження.

Також розглянемо вплив запропонованого методу на роботу пристроїв захисту та апаратів запобігання струмам витоку.

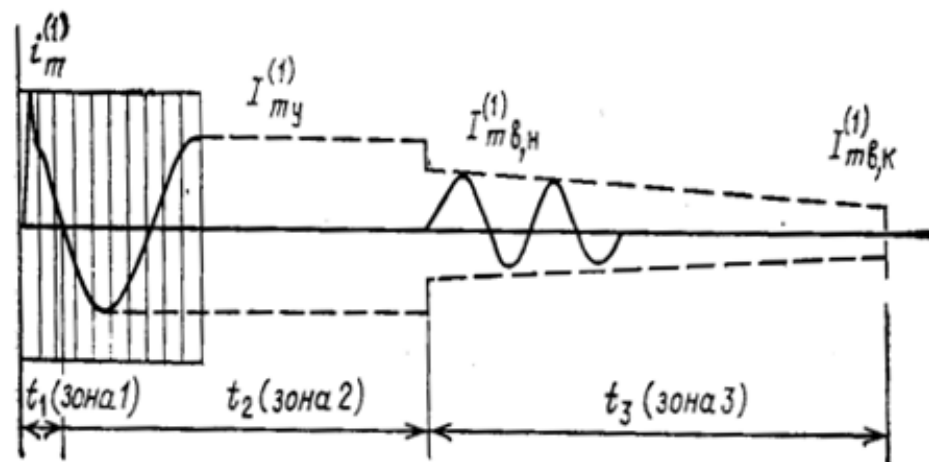


Рисунок 2.16 – Картина розподілу струмів при однофазному замиканні на землю з боку споживачів електричної енергії: 1 – перехідні режими; 2 – усталені режими при $I_{m,y}^{(1)}$; 3 – усталені режими при $I_{m,в,н}^{(1)}$ обмежені до рівня

$$I_{m,в,к}^{(1)}$$

Для контуру короткого замикання:

$$R_v = R_h + R_0 + R_{\text{оп}} \quad (2.51)$$

де R_h — опір людини;

R_0 — опір одягу;

$R_{\text{оп}}$ — опір розтікання.

Тоді відшукуваний опір:

$$R_{h,\text{min}} = \frac{74}{U_h + 7} + 0,3 \quad (2.52)$$

Опір що розсіюється:

$$R_{\text{оп}} = \frac{\rho}{4\pi b} \ln \frac{4b}{l} \quad (2.53)$$

де ρ — опір;

l — довжина;

b — ширина;

a — відстань.

Для струму:

$$i_e^{(1)} = \frac{3e_t}{\sqrt{9R_n^2 + (1/\omega_t C_{o,l})^2}} \quad (2.54)$$

де e_t — ЕРС;

ω_t — частота;

$C_{o,l}$ — ємність.

Для ЕРС:

$$e_t = 0,9U_{ном} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) \quad (2.55)$$

де τ — стала.

Тоді складові електромеханічної сталої часу:

$$\tau_{пр} = \frac{\Sigma GD^2 n^2}{365 \Sigma P_{ном}} \quad (2.56)$$

де GD^2 — момент інерції.

Визначимо струм, що може діяти на тіло людини:

$$I_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{3U_{\phi}}{\sqrt{9R_{\text{ч}}^2 + (X_C/K)^2}} \leq I_{\text{н,т}} \quad (2.57)$$

де $R_{\text{ч}}$ — опір;

$I_{\text{н,т}}$ — струм.

З врахуванням часу перехідного процесу:

$$I_{\text{н,т}} = 65/\sqrt{t}$$

Обравши відповідні коефіцієнти K через опори з (2.13) розв'язуємо рівняння (2.57).

Висновки по розділу

Важливою складовою при цьому є ступінь пошкодження, що буде відповідати характеру протікання перехідних процесів відповідно до аварійного виникнення при перехідному процесі у джерелі живлення, що має наявні ознаки режиму короткого замикання, що може відбуватися у різних ступенях:

- Між «фазою» та «нульовим» або «заземлюючим» дротом мережі або навантаження;
- Між «фазою» та «фазою» мережі або навантаження;
- Між декількома «фазами» та «нульовим» або «заземлюючим» дротом мережі або навантаження;
- Між декількома «фазами» мережі або навантаження.

Наступною задачею щодо виявлення характерних ознак розвитку аварійної ситуації є розділення подібних процесів та зняття струмових характеристик.

Останні дозволяють зробити аналіз протікання перехідних процесів що буде відрізнитись за швидкістю наростання фронту струму та його амплітудного значення.

Таким чином можна зробити висновок щодо можливості застосування тої чи іншою методики.

Для вирішення задачі точного настроювання захисного обладнання слід скласти схему заміщення та розрахувати параметри джерела живлення та навантаження у електричній мережі, що сприятиме полегшеному розрахунку уставок захисних спрацьовувань при виявленні ознак аварійної ситуації.

Таким чином точність розрахунків зміни параметрів мережі живлення впливатиме на своєчасність виявлення аварійних режимів та припинення їх розповсюдження.

Висновки

Метою роботи є дослідження процесу зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В.

У роботі розглянуто процес зміни електричних величин при однофазному замиканні на землю у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В.

Запропоновано метод встановлення характеристик однофазного пошкодження у розподільчих електричних мережах напругою вище 1000 В та визначено загальні закономірності зміни електричних параметрів для способу захисту у розподільчих електричних мереж напругою вище 1000 В при однофазному замиканні на землю з використанням шунтування.

Також досліджено метод зменшення втрати напруги у мережі живлення при застосуванні захисних заходів, а також зроблено оцінку ефективності впровадження запропонованих рішень.