Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Конспект лекцій
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
денної і заочної форм здобуття освіти за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронний ресурс

Харків – 2026

УДК 621.316.9
С 40

Рецензенти:

Ю. С. Олійник – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»;

О. Б. Єгоров – кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки ХНУМГ імені О. Бекетова.

Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 8 від 21 травня 2026 року)

Системи заземлення та захист від перенапруг : конспект лекцій для здобувачів
С 40 вищої освіти першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад. П. В. Васюченко. – Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026. – (PDF 146 с.).

У конспекті лекцій з дисципліни «Системи заземлення та захист від перенапруг» розглянуті питання класифікації електричних мереж за значенням електричних величин при однофазному короткому замиканні на землю, проаналізовані режими роботи різних випадків заземлення нейтралей трансформаторів, особливості виникнення перенапруг й умов захисту від них.

Видання призначене здобувачам вищої освіти першого (бакалаврського) рівня здобуття освіти денної та заочної форм навчання інженерних спеціальностей.

УДК 621.316.9

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026
© Васюченко П. В., уклад., 2026

ЗМІСТ

Вступ	4
Тема 1. Класифікація мереж за значення електричних величин при однофазному замиканні на землю	7
Тема 2. Мережі з ефективним заземленням нейтралі	15
Тема 3. Мережі з ізольованою нейтраллю	24
3.1. Мережі із ізольованою нейтраллю в нормальному режимі	24
3.2. Режим сталого замикання на землю	26
3.3. Режим дугового замикання на землю	31
Тема 4. Мережі з компенсацією ємнісного струму	52
4.1. Компенсована мережа при стійкому замиканні на землю	52
4.2. Компенсована мережа у нормальному режимі	64
4.3. Перехідні процеси при замиканні на землю в мережі з компенсацією ємнісного струму	66
4.4. Перенапруги при дугових замиканнях у мережі з компенсацією ємнісних струмів	80
4.5. Вплив точності налаштування компенсації ємнісних струмів на процеси, що визначають ефективність компенсації	86
Тема 5. Мережі з резистивним заземленням нейтралі	92
5.1. Мережі з резистивним заземленням нейтралі при стійкому замиканні на землю та нормальному режимі роботи мережі	94
5.2. Вплив резистивного заземлення нейтралі на перенапруження при повторних запалюваннях дуги	98
Тема 6. Мережі з комбінованим заземленням нейтралі	107
Тема 7. Повна компенсація струму замикання на землю	112
Тема 8. Перенапруги і захист від них	116
8.1. Класифікація перенапруг	116
8.2. Внутрішні перенапруги	117
8.3. Грозозахист повітряних ліній електропередач і підстанцій	118
8.4. Засоби захисту від перенапруг	122
8.5. Хвильові процеси в лініях	124
8.6. Хвильові процеси в обмотках трансформаторів	130
8.7. Перенапруги при відключенні ненавантажених ЛЕП і батарей конденсаторів	139
Висновок	144
Список використаних джерел	145

ВСТУП

Для промислового електропостачання в цей час в Україні широко використовується система трифазного змінного струму із частотою 50 Гц при різних напругах від 750 кВ при передачі електроенергії на більші відстані до 0,4 кВ у споживачів.

Споживачі електричної енергії підключаються до лінійних напруг (за винятком дрібних споживачів у мережі з номінальною напругою 0,4 кВ) і утворюють трифазне навантаження, з'єднаною або в зірку з ізольованої нейтраллю, або в трикутник. За таких умов напруги всіх трьох фаз щодо заземлених частин електроустаткування, як прийнято говорити – відносно землі, у нормальному режимі роботи електроустановки рівні між собою й зрушені відносно один одного на 120 електричних градусів і тому потенціал нейтральних крапок (генераторів, трансформаторів) щодо землі дорівнює нулю. Очевидно, що спосіб з'єднання нейтралі із землею (через опір, наглухо або відсутність з’єднання) за таких умов у нормальному режимі роботи, тобто при відсутності замикань або обривів фаз, не впливає на значення лінійних напруг і, отже, на роботу споживачів.

Однак при експлуатації необхідно зважати на можливість виникнення різних ушкоджень електроустаткування. Найчастіше виникають порушення, пов'язані з ушкодженнями ізоляції між фазою й землею, які називають замиканнями на землю.

При заземленні однієї фази на землю симетрія фазних напруг порушується й тому спосіб заземлення нейтралі виявляє суттєвий вплив на електричний режим системи, тобто на рівні напруг фаз щодо землі, струми в місці замикання й інші електричні величини. Ці фактори впливають на надійність електропостачання споживачів, на необхідні рівні електричної міцності ізоляції фаз щодо землі, на виконання захисту від перенапруг і на способи виконання релейного захисту. Бажане вибрати такий режим

нейтралі, при якім з урахуванням усіх факторів розрахункові витрати на спорудження й експлуатацію електроустаткування були б мінімальними. Практично питання про режим нейтралі не вирішується індивідуально при спорудженні кожної електроустановки. Великий досвід проектування, будівництва й експлуатації електричних систем привів до того, що це питання на протязі тривалого часу вирішувався однозначно – залежно від номінальної напруги електроустановки.

При напрузі 0,4 кВ застосовується глухе заземлення нейтралі, при напрузі від 6кВ до 35 кВ включно – ізольована нейтраль і заземлення через дугогасильні реактори, що гасять (компенсація ємнісного струму). У мережах 110 кВ і вище застосовується так зване ефективне заземлення нейтралі.

В останні роки на основі результатів численних наукових досліджень, вітчизняного й закордонного досвіду у вітчизняній енергетиці є стійка тенденція до часткового перегляду режимів заземлення нейтралі в електроустановках 6¸ 35 кВ, які прийнято називати електроустановками середньої напруги. Пропонуються й впроваджуються в практику наступні способи заземлення нейтралі:

- заземлення через активний опір (резистивне заземлення) у мережах з порівняно невеликою сумарною довжиною ліній і особливо в повітряних мережах;
- комбіноване заземлення нейтралі в електричних мережах з великою сумарною довжиною ліній, яке полягає в тому, що додатково паралельно дугогасильному реактору підключається резистор з опором, який підбирається певним чином;
- заземлення нейтралі через елементи, що забезпечують компенсацію, як ємнісної, так і активної складових струму в місці замикання.

Спосіб заземлення нейтралі вирішальним образом впливає на перенапруги, що виникають при дугових замиканнях на землю. Тому питання, пов'язані з вибором способу заземлення нейтралі, тісно зв’язані з

іншими застосовуваними в цей час засобами обмеження перенапруг за допомогою різних технічних засобів, наприклад, розрядників, нелінійних обмежників перенапруг та ін. Важливо також те, що способи заземлення нейтралі визначають також і спосіб виконання селективного захисту від замикань на землю. За інших рівних умов перевага повинна бути віддане такому способу заземлення нейтралі, при якім захист від замикання на землю виходить досить простий і надійної.

Згадана вище тенденція зміни режимів нейтралі в мережах середньої напруги обумовлена не тільки результатами наукових досліджень, але також і тим, що в останні роки розроблені необхідні для реалізації цих змін технічні засоби, а саме - силові високовольтні резистори, керовані дугогасильні реактори й ін.

МОДУЛЬ 1 СИСТЕМИ ЗАЕЗМЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

ТЕМА 1. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕРЕЖ ЗА ЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ЗАМИКАННІ НА ЗЕМЛЮ

Основним критерієм такої класифікації є значення напруги на неушкоджених фазах при стійкому (металевому або глухому) замиканні однієї фази на землю. Мережі, у яких режим заземлення нейтрали такий, що напруги на неушкоджених фазах при замиканні однієї фази на землю не перевищують $0.8U_{ном}$, прийнято називати мережами з ефективно заземленої нейтраллю, у всіх інших випадках – мережами з неефективно заземленої нейтраллю. При цьому, як буде докладніше розглянуте нижче, значення напруг на неушкоджених фазах залежно від режиму заземлення нейтрали не займають усієї можливої області значень, а нормуються у відповідності з номінальною напругою електроустановок.

Ефективне заземлення нейтрали застосовується в мережах 110 кВ і вище, у мережах з номінальною напругою 35 кВ і нижче може застосовуватися неефективне заземлення нейтрали, коли при однофазнім замиканні на землю напруги на неушкоджених фазах перевищують значення $0.8U_{ном}$ і, як правило, досягають значення лінійної напруги.

У загальному випадку, співвідношення електричних величин при однофазному замиканні на землю визначається співвідношенням еквівалентних опорів прямій, зворотної й нульовий послідовностей, які, у свою чергу, визначаються конструкцією елементів електричної мережі. Зокрема значення цих опорів для лінії електропередач залежать від взаємоіндукції між фазами й ланцюгами паралельних ліній, від умов повернення струму замикання через землю й від деяких інших факторів.

Для виділення областей різних типів мереж залежно від режиму

заземлення нейтрали розглянемо електричну мережу, прийнявши ряд допущень:

- активні опори елементів мережі дорівнюють нулю;
- опору прямій, зворотної й нульовий послідовностей виділеної еквівалентної ділянки електричної мережі ухвалюються однаковими;
- режим заземлення нейтралі змінюється за рахунок зміни індуктивного опору x_N, включеного між нейтральною крапкою мережі й землею (рис. 1.1), що приводить до зміни співвідношень між результуючими опорами прямій, зворотної й нульовий послідовності. Облік тільки індуктивних опорів близько відповідає реальним умовам і в той же час на даному етапі значно спрощує аналіз. Також для спрощення враховані тільки ємнісні провідності фаз щодо землі, тому що активні провідності малі й впливають на електричні величини, що відшукуються.

Прийнятим допущенням відповідає схема заміщення на рис. 1.1. Зміна режиму заземлення нейтрали за рахунок зміни індуктивного опору x_N прийняте для спрощення в даному академічному прикладі.

Практично, наприклад, для одержання режиму ефективного заземлення нейтрали, наглухо заземлюються нейтральні крапки певної частини силових трансформаторів мережі, що приводить до отримання необхідного співвідношення між опорами прямій, зворотної й нульовий послідовностей.

При замиканні на землю, наприклад, фази А нас будуть цікавить наступні електричні величини: напруга на неушкоджених фазах щодо землі U_B і U_C, напруга нейтрали U_N і струм у місці замикання $I_З$.

Для спрощення викладень і розрахунків усі опори й електричні величини виразимо у відносних одиницях, прийнявши за базисні величини опір $x_ф$ і фазну Е.Р.С. джерела E_A (вектор Е.Р.С. фази А спрямований по речовинній осі).

Тоді у відносних одиницях:

$x_{ф*} = 1$ – поздовжній індуктивний опір фази,

$x_{C*} = x_C / x_ф$, $x_C = 1/\omega C_ф$ ємнісний опір фази відносно землі,

$x_{N*} = x_N / x_ф$ - опір між нейтраллю й землею.

Базисним струмом при прийнятій системі відносних одиниць буде величина $I_б = E_A / x_ф$

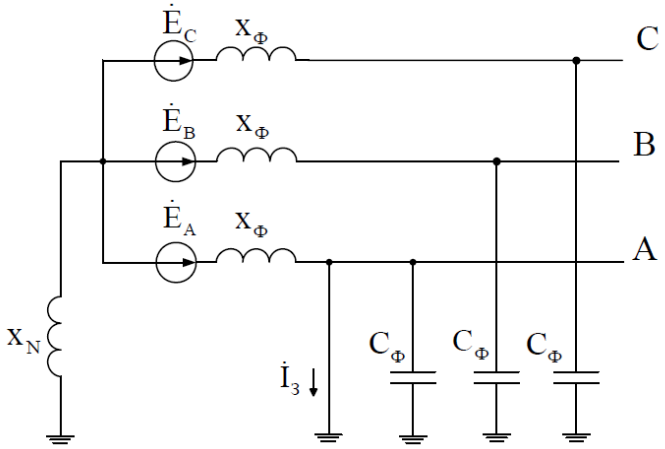


Рис. 1.1 - Спрощена схема заміщення для визначення електричних величин при замиканні на землю

Напруга між нейтраллю системи й землею в загальному випадку може бути визначене по формулі

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A \underline{Y}_A + \dot{E}_B \underline{Y}_B + \dot{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}. \qquad (1.1)$$

При замиканні на землю фази А реактивні провідності, що входить у формулу (1.1), будуть рівні

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{jx_ф}, \qquad \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \frac{1}{j(x_ф - x_C)}, \qquad \underline{Y}_N = \frac{1}{jx_N}.$$

З урахуванням цих значень провідностей, а також прийнятої системи відносних одиниць одержимо після спрощення

$$\dot{U}_{N*} = -\frac{x_{C*} x_{N*}}{x_{N*}(x_{C*} - 3) + (x_{C*} - 1)}. \qquad (1.2)$$

Напруги на неушкоджених фазах при замиканні на землю рівні

$$\dot{U}_{B*} = \dot{E}_{B*} + \dot{U}_{N*};$$
$$\dot{U}_{C*} = \dot{E}_{C*} + \dot{U}_{N*}. \qquad (1.3)$$

Струм у місці замикання

$$\dot{I}_{З*} = \frac{\dot{E}_{A*} + \dot{U}_{N*}}{jx_{Ф*}}. \qquad (1.4)$$

Криві, що ілюструють зміну абсолютних значень напруги на неушкоджених фазах U_{B*} і U_{C*} , напруги $\dot{U}_{N*}$ і струму $I_З*$ при зміні x_{N*} наведені на рис.1.2, а, б. Відзначимо, що практично завжди $X_C \geq X_Ф$. У даному прикладі прийняте $X_{C*} = 100$.

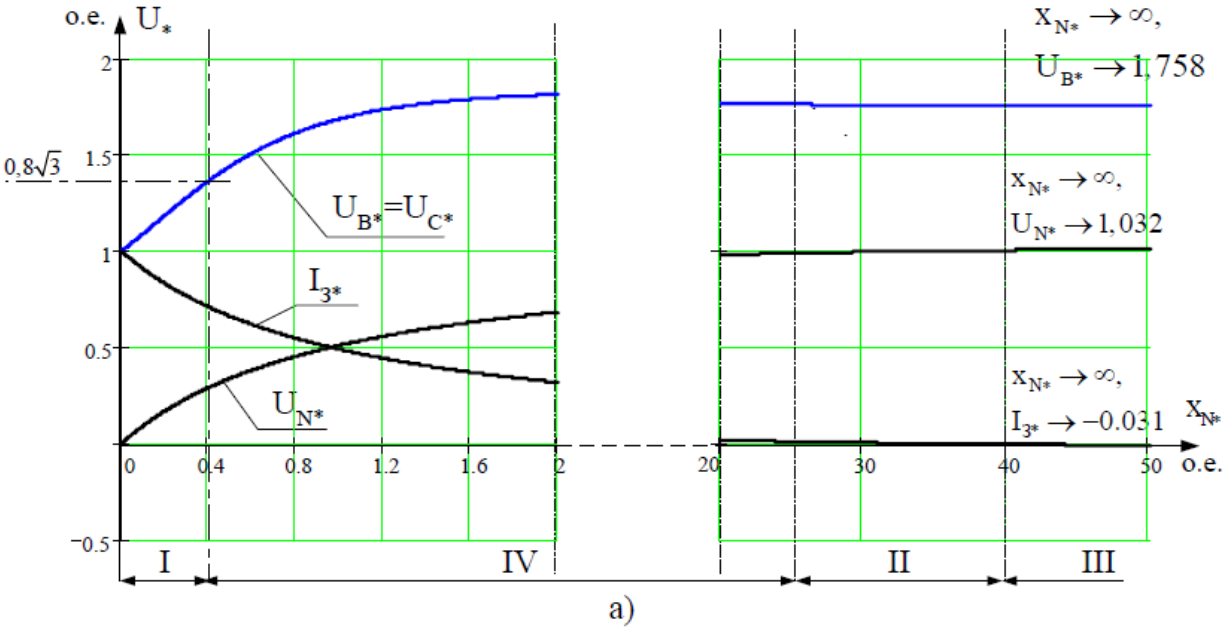
Як видне, з ростом опору в нейтралі відбувається збільшення напруги на неушкоджених фазах. При $x_{N*} = 0$ воно не перевищує фазної напруги, а при $x_{N*} \to \infty$, тобто при ізольованої нейтралі, збільшується до значення трохи перевищуючого номінальну (лінійну) напруга електроустановки. Зростання напруги до значення, що перевищує лінійне, пояснюється частковим резонансом між поздовжніми індуктивними опорами фаз $x_Ф$ і поперечними ємнісними опорами X_C.

Значення напруги на неушкоджених фазах при замиканні на землю є одним з найважливіших факторів, що визначають техніко-економічні показники електричних мереж. Тому класифікація режимів нейтралі, як раніше говорилося, проводиться залежно від значення цієї напруги.

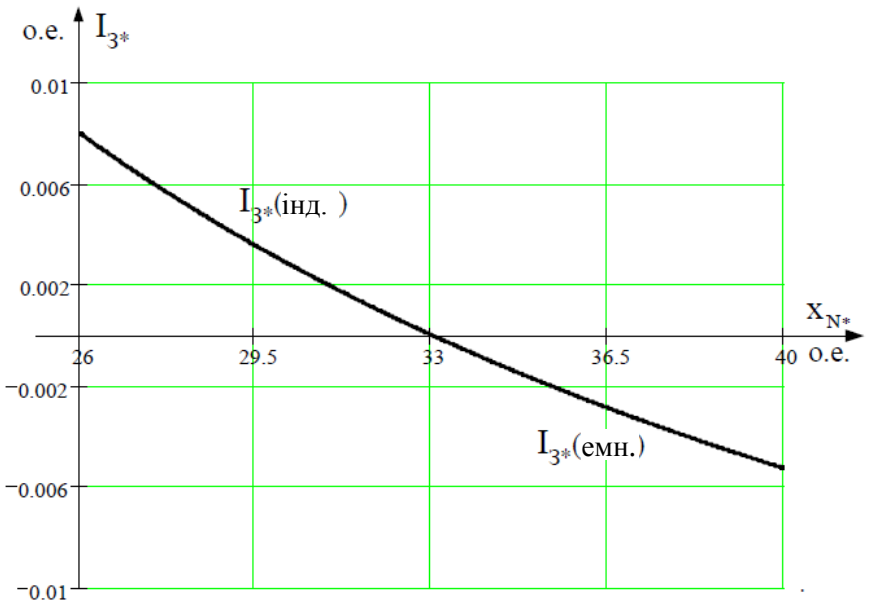
При $U_B = U_C \leq 0,8U_{ном}$ (при прийнятих відносних одиницях $U_{B*} = U_{C*} \leq 0,8\sqrt{3}$) заземлення нейтралі називають ефективним, підкреслюючи цим, що, завдяки вибору певного режиму заземлення нейтралі, досягають значного обмеження напруги на неушкоджених фазах при замиканні на землю. На рис 1.2, а область ефективного заземлення нейтралі позначена цифрою I.

Частковим випадком ефективного заземлення нейтралі є глухе

заземлення нейтралі, для реалізації якого ухвалюються всі заходи до досягнення мінімально можливого опору в ланцюзі нейтралі. Практично це досягається з'єднанням нейтралей усіх трансформаторів зі спеціальним заземленим проведенням, яке називається нульовим проведенням. Такий режим нейтралі застосовується в електричних мережах з номінальною напругою 380 В.



а)



б)

Рис. 1.2 –Заземлення нейтралі

На рисунку 1.2: а) – напруги на неушкоджених фазах $\dot{U}_{B*}$, $\dot{U}_{C*}$, нейтралі $\dot{U}_{N*}$ і струм замикання $I_{З*}$ при однофазнім замиканні на землю: I – область мереж з ефективним заземленням нейтралі;

II – область мереж з компенсацією ємнісного струму замикання; III – область мереж з ізольованої нейтраллю;

IV – область невикористовуваних режимів;

б) – струм замикання $I_{З*}$ в області II при відхиленні від точної компенсації приблизно на ±20%

Як видно, обмеження напруги на неушкоджених фазах за рахунок заземлення нейтралі через малий опір супроводжується різким збільшенням струму замикання, який протікає в основному по ушкодженій фазі. Цей струм порівняємо зі струмом при міжфазних коротких замиканнях, тому тривала робота електроустановок з ефективним заземленням нейтралі при замиканні на землю не допустима. Практично здійснюється швидке відключення елементів із замкненої на землю фазою від джерела живлення за допомогою релейного захисту.

При $x_{N*} = \infty$ одержуємо режим, відповідний до роботи системи з ізольованої нейтраллю. Як уже вказувалося, при ізольованої нейтралі напруга на неушкоджених фазах при замиканні на землю може навіть трохи перевищувати номінальну лінійну напругу. Струм замикання при ізольованої нейтралі визначається в основному ємнісними провідниками фаз щодо землі й значно менше струмів при міжфазних коротких замиканнях. При прийнятих вище умовах розрахунків $I_{З*} = 0,031$. У реальних мережах цей струм лежить у межах від часток ампера до декількох сотень амперів. По існуючим нормам для розподільних мереж вважається припустимим довготривале протікання ємнісного струму замикання, якщо він не перевищує при номінальних напругах 6, 10 і 35 кВ відповідно 30, 20 і 10 А. Якщо ємнісний струм замикання на землю перевищує зазначені вище значення, то його компенсують включенням у ланцюг нейтралі реактора з

таким індуктивним опором, при якому індуктивний струм у місці замикання близький до ємнісного струму замикання. Мережі з таким режимом нейтралі називають мережами з компенсацією ємнісного струму замикання або коротко компенсованими мережами. Область, що відповідає компенсованим мережам, позначена цифрою II (рис. 1.2, а).

При певному значенні індуктивного опору в ланцюзі нейтралі наступає повна компенсація ємнісного струму замикання. У цьому випадку цей опір, визначений по (1.4), за умови $I_{З*} = 0$, дорівнює $x_{N*} = \frac{x_{C*} - 1}{3}$. Так як, $x_C >> x_Ф$, тобто при прийнятої системі відносних одиниць $x_{C*} >> 1$ і практичною умовою компенсації ємнісного струму є рівність індуктивного опору в нейтралі й еквівалентного ємнісного опору трьох фаз мережі відносно землі $x_{N1*} = \frac{x_{C*}}{3}$.

Залежність струму замикання від x_{N*} у зоні, відповідної до мереж з компенсацією ємнісного струму, при відхиленні від точного настроювання приблизно на ±20% наведена на рис. 1.2, б.

У компенсованих мережах так само, як і в мережах з ізольованої нейтраллю при замиканні на землю має місце підвищення напруги на неушкоджених фазах до значень, близьких до лінійної напруги. Так само, як і в мережах з ізольованої нейтраллю в компенсованих мережах припустима тривала робота при наявності замикання на землю, звичайно за умови, що ізоляція фаз щодо землі розрахована на тривалий додаток лінійної напруги.

Значення струмів при однофазному замиканні в мережах з тим або іншим режимом нейтралі важливі не тільки з погляду можливості ураження устаткування при їхньому протіканні. При малих струмах, тобто в мережах з ізольованої нейтраллю або в компенсованих мережах, падіння напруги від їхнього протікання на поздовжніх опорах мережі (опорах ліній, трансформаторах і т.п.) малі й тому лінійні напруги, до яких підключені

споживачі, спотворюються незначно. При ефективному і глухому заземленні нейтралі може мати місце помітне порушення симетрії лінійних напруг при однофазному замиканні.

У зв'язку з тим, що в мережах з ефективним і глухим заземленням нейтралі замикання фази на землю викликає протікання більших струмів, що значно перевищують робочі струми, прийняте однофазне замикання в таких мережах називати «однофазним коротким замиканням». На відміну від цього стосовно до мереж з ізольованої нейтраллю й до компенсованих мереж використовують терміни «однофазне замикання» або «замикання на землю».

ТЕМА 2. МЕРЕЖІ З ЕФЕКТИВНИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ НЕЙТРАЛІ

Ефективне заземлення нейтралі, застосовується в електричних мережах напругою 110 кВ і вище.

Практично потрібний режим нейтралі в цьому випадку створюється безпосереднім заземленням нейтралей частини трансформаторів електричної системи. Від числа заземлених трансформаторів, їх параметрів і місця в електричній системі залежить значення опору нульової послідовності щодо місця замикання фази на землю. Цей опір і опору прямій і зворотної послідовностей визначають електричні величини при замиканні фази на землю й, зокрема, напруги неушкоджених фаз і струм однофазного короткого замикання.

Розглянемо залежність електричних величин від співвідношення опорів різних послідовностей при однофазнім короткім замиканні. Скористаємося методом симетричних складових. Опору прямій, зворотної й нульовий послідовностей: $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_0$, використовувані при виводі необхідних виражень, є еквівалентні опору щодо місця несиметрії – однофазного короткого замикання (рис.2.1).

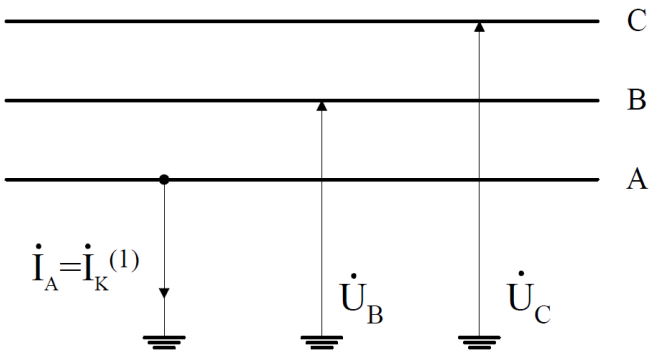


Рис. 2.1 - Однофазне коротке замикання в трифазній мережі

Як відомо, для даного виду несиметрії мають місце наступні співвідношення:

$$\dot{I}_{A0}=\dot{I}_{A1}=\dot{I}_{A2}=\frac{\dot{I}_A}{3}=\frac{I_K^{(1)}}{3}, \qquad (2.1)$$

$$\dot{U}_0 + \dot{I}_0 \underline{Z}_0 = 0, \quad \dot{U}_{A1} + \dot{I}_{A1} \underline{Z}_1 = \dot{E}_A, \quad \dot{U}_{A2} + \dot{I}_{A2} \underline{Z}_2 = 0, \tag{2.2}$$

де $\dot{I}_0, \dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}$ – струми нульової, прямої і зворотної послідовностей ушкодженої фази (фази А);

$\dot{I}_A = I_K^{(1)}$ – струм однофазного короткого замикання;

$\dot{U}_0, \dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}$ – напруги нульова, прямій і зворотної послідовності ушкодженої фази. З (2.1) і (2.2) випливає, що

$$\begin{aligned} \dot{I}_K^{(1)} &= \frac{3\dot{E}_A}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\ \dot{U}_0 &= -\frac{\underline{Z}_0 \dot{E}_A}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\ \dot{U}_{A1} &= \dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \underline{Z}_1}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\ \dot{U}_{A2} &= -\frac{\dot{E}_A \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Напруги на неушкоджених фазах стосовно землі будуть рівні

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{U}_0 + a^2 \dot{U}_{A1} + a\dot{U}_{A2}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_0 + a\dot{U}_{A1} + a^2 \dot{U}_{A2}, \end{aligned} \tag{2.4}$$

Після підстановки (2.3) в (2.4) і перетворень із обліком того, що при замиканнях у мережах 110 кВ і вище можна вважати $Z_1 \approx Z_2$, маємо

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0}{2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}, \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0}{2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}. \end{aligned} \tag{2.5}$$

Підставимо в (2.5) опору у вигляді

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= r_1 + jx_1 = x_1 (r_{1*} + jl), \\ \underline{Z}_0 &= r_0 + jx_0 = x_0 (r_{0*} + jl), \end{aligned}$$

де $r_{1*} = \frac{r_1}{x_1}$, $r_{0*} = \frac{r_0}{x_0}$.

У результаті одержимо

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{x_1(r_{1*} + jl) - x_0(r_{1*} + jl)}{2x_1(r_{1*} + jl) + x_0(r_{1*} + jl)},$$
$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{x_1(r_{1*} + jl) - x_0(r_{1*} + jl)}{2x_1(r_{1*} + jl) + x_0(r_{1*} + jl)}. \quad (2.6)$$

Значення активних опорів у схемах прямій і зворотної послідовностей у високовольтних мережах невелике й, як правило, становить 10 ÷ 20% від реактивних опорів, тобто $r_{1*} = 0{,}1 \div 0{,}2$.

При таких значеннях r_{0*} та r_{1*} при подальших перетвореннях (2.6) цими величинами в ступені вище першої і їх добутками зневажаємо. У результаті одержимо

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{E}_A \left[\frac{1-\alpha}{2+\alpha} + j3\alpha \frac{(r_{0*} - r_{1*})}{(2+\alpha)^2} \right], \quad (2.7)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{E}_A \left[\frac{1-\alpha}{2+\alpha} + j3\alpha \frac{(r_{0*} - r_{1*})}{(2+\alpha)^2} \right], \quad (2.8)$$

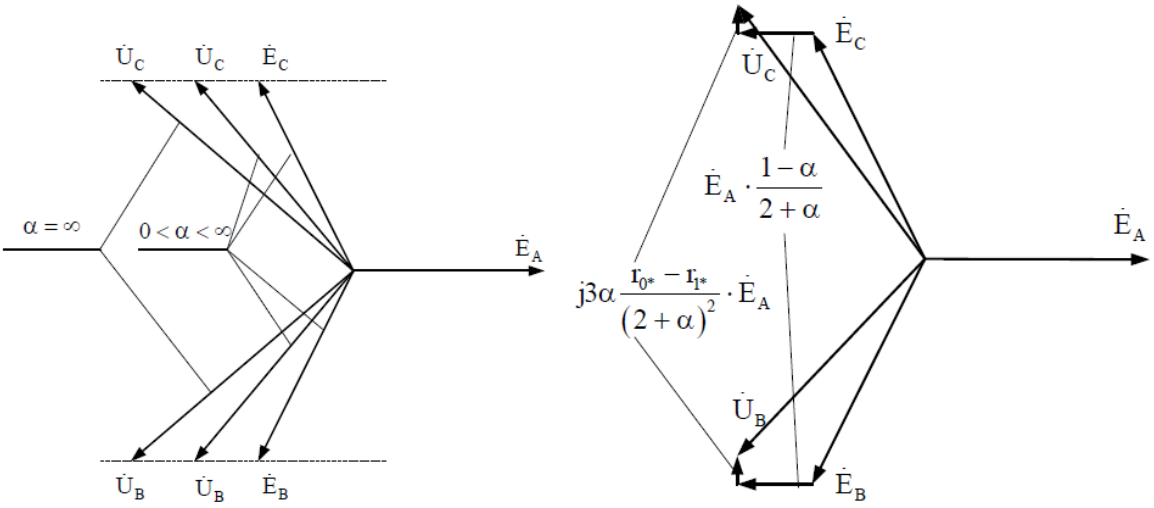
де $\alpha = \frac{x_0}{x_1}$.

Як видно з (2.7), (2.8) і з векторних діаграм (рис. 2.2, а), при неврахуванні активних опорів $(r_{1*} = r_{0*} = 0)$ напруга на непошкоджених фазах рівні. Вплив активних опорів має місце тільки при $r_{0*} \neq r_{1*}$ і проявляється в тому, що напруга на одній з неушкоджених фаз збільшується, а на іншій зменшується у порівнянні з випадком $r_{1*} = r_{0*} = 0$. Абсолютне значення напруги на непошкодженій фазі можна визначити по векторній діаграмі рис. 2.2, б.

$$U_B = E_A \sqrt{\left[\frac{1}{2} - \frac{1-\alpha}{2+\alpha}\right]^2 + \left[0{,}866 - \frac{3\alpha(r_{0*} - r_{1*})}{(2+\alpha)^2}\right]^2},$$
$$U_C = E_A \sqrt{\left[\frac{1}{2} - \frac{1-\alpha}{2+\alpha}\right]^2 + \left[0{,}866 + \frac{3\alpha(r_{0*} - r_{1*})}{(2+\alpha)^2}\right]^2}. \quad (2.9.)$$

Відношення напруги на неушкоджених фазах до номінального напрузі мережі називається коефіцієнтом заземлення $K_З$

$$K_З = \frac{U_{неп.Ф}}{U_{ном}}, \qquad (2.10)$$



а) б)

Рис. 2.2 - Векторні діаграми напруг при замиканні однієї фази на землю: а) – при $r_{1*} = r_{0*} = 0$, б) – при $r_{1*} \neq 0,\ r_{0*} \neq 0, r_{0*} > r_{1*}$

Причому в (2.10) ухвалюється напругу тієї неушкодженої фази, на якій воно найбільше (у цьому випадку напруга U_c).

Напруга на неушкодженій фазі повинне визначатися по (2.9) за умови того, що робоча напруга до замикання на землю на 5% вище номінального. Залежність коефіцієнта заземлення від параметра $\alpha = x_0/x_1$ при різних умовах наведена на рис. 2.3 (напруга віднесена до номінальної фазної напруги).

Найбільші значення КЗ мають місце при обліку активних опорів і робочій напрузі $U_{раб} = 1{,}05U_{ном}$. За таких умов, як видне по рис. 2.3, заземлення нейтралі є ефективним, якщо α = 3,4. Облік активних опорів, а також облік можливості збільшення робочої напруги на 5% впливає на вибір величини α, при якій забезпечується ефективне заземлення нейтралі. Для ілюстрації цієї обставини визначимо $K_З$ при $r_{0*} = r_{1*} = 0$ та при $U_{роб}$=$U_{ном}$. Відповідна залежність також наведена на рис. 2.3. Як видно, при цьому можна прийти до висновку, що ефективне заземлення виходить при α = 5.

Напруга на неушкоджених фазах при однофазнім короткому замиканні впливає на вибір грозозахисних розрядників.

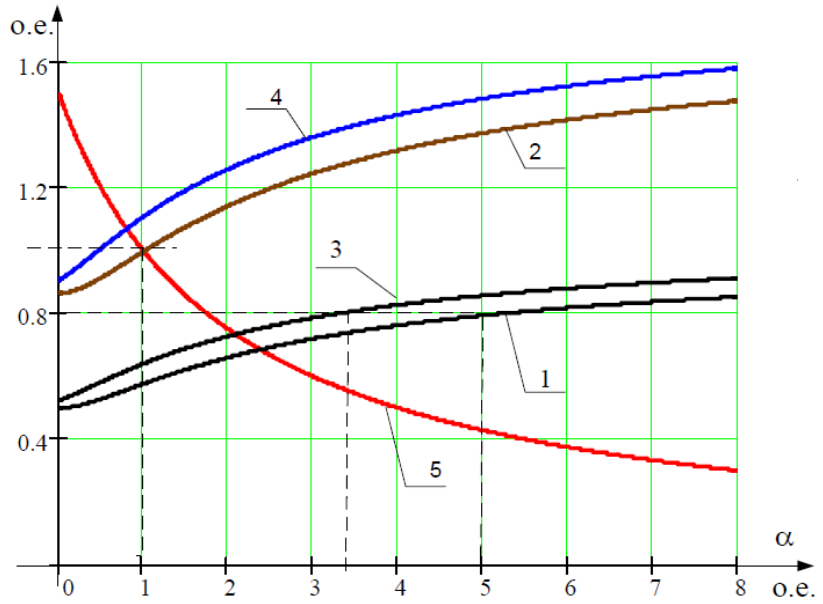


Рис. 2.3 - Залежність електричних величин при однофазнім замиканні від α при різних умовах:

1, 2 – відповідно коефіцієнт заземлення й напруга на неушкодженій фазі при $r_{1*} = r_{0*} = 0$ і $U_{роб}=U_{ном;}$

3, 4 – відповідно коефіцієнт заземлення й напруга на неушкодженій фазі при $r_{0*} - r_{1*} = 0,2$ і $U_{роб}=1,05U_{ном}$;

5 – відношення струму однофазного короткого замикання до струму трифазного $К_З$ при $r_{1*} = r_{0*} = 0$ і $U_{роб}=U_{ном}$.

При ефективному заземленні нейтралі застосовуються розрядники, які прийнято називати 80%-ними розрядниками. У тому випадку, якщо напруга на неушкоджених фазах перевищує 0,8 номінального, заземлення вважається неефективним і для таких систем застосовується 115%-ний розрядник відповідно до можливої напруги на неушкоджених фазах при замиканні на землю. Можливість використання грозозахисних розрядників при ефективному заземленні нейтралі на знижену напругу дає істотну економію в ізоляції. Через цей ефективне заземлення нейтралі застосовується при високих напругах, коли вартість ізоляції становить значну частину вартості

устаткування.

Важливе практичне значення має співвідношення між струмами однофазного й трифазного короткого замикання при різних значеннях α. При неврахуванні активних опорів струм однофазного короткого замикання з (2.3).

$$I_K^{(1)} = \frac{3E_A}{2x_1 + x_0}.$$

Струм трифазного короткого замикання рівний

$$I_K^{(3)} = \frac{E_A}{x_1}.$$

Відношення цих струмів (рис. 2.3)

$$\frac{I_K^{(1)}}{I_K^{(3)}} = \frac{3x_1}{2x_1 + x_0} = \frac{3}{2 + \alpha}. \qquad (2.11)$$

Важливо відзначити, що при $\alpha < 1$, $I_K^{(1)} > I_K^{(3)}$. Такий режим, коли $I_K^{(1)} > I_K^{(3)}$ небажаний, тому що в цьому випадку електроустаткування (вимикачі, роз'єднувачі й ін.) повинне вибиратися по струму $I_K^{(1)}$, більшому чим $I_K^{(3)}$, що може привести до збільшення витрат на спорудження електроустановок.

Заземленням певної частини трансформаторів принципово можна створити в електричній мережі такий режим нейтралі, що при однофазному короткому замиканні одночасно будуть виконуватися умови $K_з \le 0{,}8$ и $I_K^{(1)} < I_K^{(3)}$, тобто $1 < \alpha < 3$.

Однак є ряд факторів, які не дозволяють в електричній системі заземлювати нейтралі трансформаторів виходячи тільки з умов забезпечення бажаного електричного режиму при однофазному короткому замиканні.

Такими факторами є:

1. Ізоляція нейтралі силових трансформаторів з економічних міркувань виконується зниженої. Трансформатори напругою 110 кВ, виготовлені до 1968 року, мають ізоляцію нейтралі класу 35 кВ, однохвилинна іспитова напруга якої дорівнює 85 кВ. У трансформаторів, що випускаються після

1968 року, ізоляція нейтралі посилена й має однохвилинні іспитові напруги відповідно для номінальних напруг 110, 150 і 220 кВ – 100, 130 і 200 кВ.

Тому трансформатори в електричних мережах до 220 кВ включно дозволяється не заземлювати за умови установки між нейтраллю й землею відповідного розрядника.

Іспитові напруги нейтралі трансформаторів 330 кВ і вище не нормуються, тому нейтралі цих трансформаторів повинні заземлюватися обов'язково.

2. Нейтралі автотрансформаторів повинні заземлюватися обов'язково незалежно від напруги, тому що в противному випадку при однофазному замиканні на землю в мережі вищої напруги може мати місце неприпустиме підвищення напруги на фазах у мережі більш низької напруги.

3. На електростанціях трансформатори бажане тримати заземленими щоб уникнути роботи з незаземленої нейтраллю в випадку відділення електростанції від системи.

4. На підстанціях знижувальні трансформатори при відсутності зазначених вище обмежень бажане не заземлювати, тому що при цьому поліпшуються умови роботи захисту від однофазних коротких замикань.

Необхідність виконання перерахованих додаткових умов заземлення нейтралей трансформаторів може привести до того, що умова $\alpha > 1$ не буде виконано й, отже, струм однофазного короткого замикання може стати більше струму трифазного короткого замикання.

Обмеження струму однофазного короткого замикання з одночасним збереженням напруг на нейтралях трансформаторів не вище припустимого може бути досягнуте шляхом заземлення більшого числа трансформаторів, але не наглухо, а через реактори або резистори. Такий спосіб заземлення нейтралі є гарним розв'язком питання вибору режиму нейтралі, особливо в мережах 330 кВ і вище. Однак перехід до заземлення нейтралі через реактори або резистори в мережах цього класу напруги вимагає дуже більших витрат.

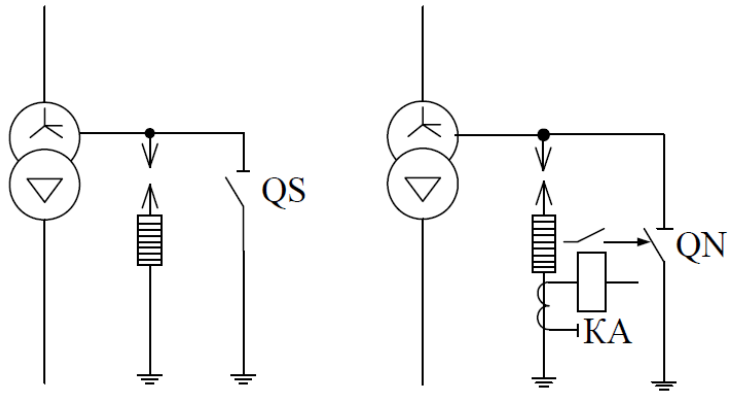
Суперечливі вимоги необхідності обмеження струму однофазного струму короткого замикання й обмеження напруги на нейтралі в незаземлених трансформаторів сполучаються шляхом встановлення між нейтраллю й землею розрядників.

Можливі схеми ланцюга нейтралей трансформаторів для мереж 110, 220 кВ показані на рис. 2.4.

Нейтраль трансформаторів може бути або глухо заземлена, або розземлена. В останньому випадку ізоляція нейтралі захищається від перенапруг вентильним розрядником. Рекомендується залежно від номінальної напруги застосовувати розрядники, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Розрядники

Номінальна напруга, кВ	Розрядник
110	РВМ-35+РВМ-20
150	РВС-60
220	РВС-110



а) б)

Рис. 2.4 - Схеми заземлення трансформаторів: а) – типова схема; б) – схема з автоматичним шунтуванням розрядника

Для підвищення надійності роботи розрядника в схемі (рис. 2.4, а) він повинен бути розрахований на супровідний струм короткого замикання.

Запропонований ряд схем, які дозволяють автоматично змінювати значення або характер опору в нейтралі залежно від режиму роботи системи. Прикладом такої схеми є схема, показана на рис. 2.4, б. З появою в ланцюзі розрядника супроводжуючого струму, що дає, близького до граничного струму для даного розрядника, подається команда на включення швидкодіючого короткозамикача, який шунтує розрядник.

ТЕМА 3. МЕРЕЖІ З ІЗОЛОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

3.1. Мережі із ізольованою нейтраллю в нормальному режимі

У мережах з ізольованої нейтраллю проведення трифазної системи зв’язані із землею через ємності й активні опори ізоляції, розподіленні по довжині ліній. На рис. 3.1 наведена схема заміщення незаземленої мережі без навантаження.

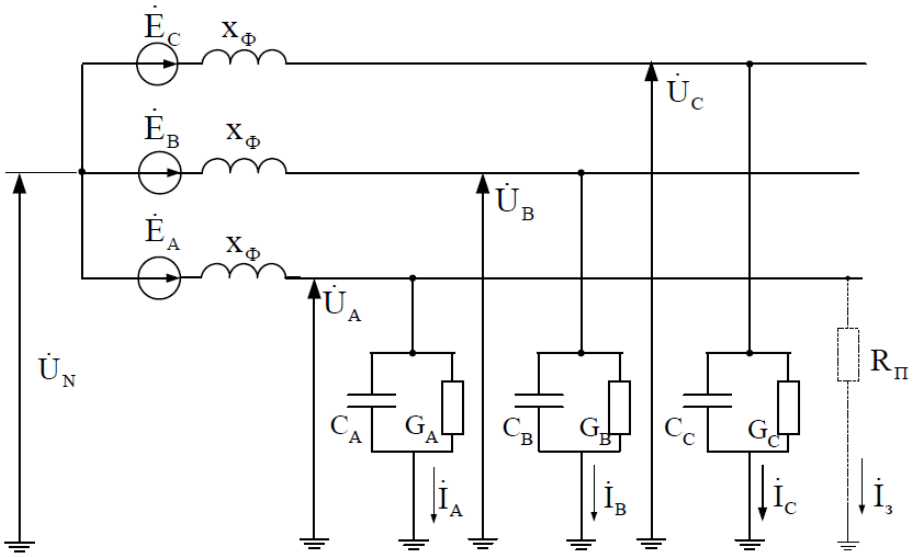
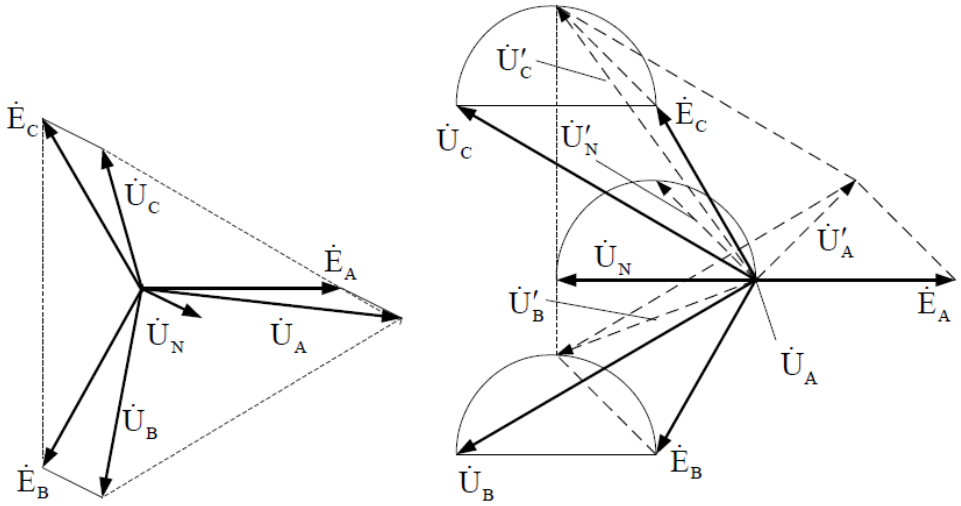


Рис. 3.1 - Схема заміщення мережі з ізольованої нейтралью



а) б)

Рис. 3.2 - Векторні діаграми напруг: а) – для нормального режиму при $U_N \neq 0$; б) – при замиканні фази А на землю

Схема заміщення включає джерело живлення, еквівалентну лінію, ємності фаз (C_A, C_B, C_C) і активні провідності G_A, G_B, G_C, які прийняті зосередженими, що цілком припустимо в області частот, яку займають, процеси, що розглядаються. Внутрішній опір джерела живлення й поздовжні опори ліній мережі набагато менше, чим опір фаз щодо землі, тому при стійких замиканнях ними також можна зневажити.

При прийнятих допущеннях можна записати

$$\dot{I}_A = \left(\dot{E}_A + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_A, \quad \dot{I}_B = \left(\dot{E}_B + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_B, \quad \dot{I}_C = \left(\dot{E}_C + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_C,$$

де $\dot{U}_N$ – напруга на нейтралі щодо землі,

$\dot{E}_A = \dot{E}_\Phi$, $\dot{E}_B = a^2\dot{E}_\Phi$, $\dot{E}_C = a\dot{E}_\Phi$ – Е.Р.С. джерела живлення;

$\underline{Y}_A = G_A + j\omega C_A$; $\underline{Y}_B = G_B + j\omega C_B$; $\underline{Y}_C = G_C + j\omega C_C$;

ω – кругова частота промислового струму. При відсутності замикання на землю сума струмів $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ дорівнює нулю, тобто

$$\left(\dot{E}_A + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_A + \left(\dot{E}_B + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_B + \left(\dot{E}_C + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_C = 0.$$

Розв'язавши це рівняння відносно U_N, одержимо

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_\Phi\left(\frac{G_A + a^2 G_B + aG_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} + j\omega\frac{C_A + a^2 C_B + aC_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}\right). \qquad (3.1)$$

Так як $1 + a^2 + a = 0$, то напруга $\dot{U}_N$, як слідує із (3.1). не рівно нулю тільки в тому випадку, якщо провідності $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ не рівні між собою, тобто порушена симетрія фаз мережі. Абсолютне значення напруги U_N, що має місце в нормальному режимі роботи мережі називають напругою зміщення нейтралі. Представимо (3.1.) в наступному вигляді

$$\dot{U}_N = -E_\Phi\left(\frac{G_A + a^2 G_B + aG_C + j\omega\left(C_A + a^2 C_B + aC_C\right)}{G_\Sigma + j\omega C_\Sigma}\right),$$

де $G_\Sigma = G_A + G_B + G_C$; $C_y = C_A + C_B + C_C$.

Далі, розділивши чисельник і знаменник отриманого вираження на ωС, одержимо

$$\dot{U}_N = -E_Ф\left(\frac{б_G + jб_C}{d+j}\right),$$

де $б_G = \frac{G_A + a^2 G_B + aG_C}{шC_Σ}$ – коефіцієнт несиметрії активних провідностей фаз мережі;

$б_C = \frac{C_A + a^2 C_B + aC_C}{C_Σ}$ – коефіцієнт ємнісної несиметрії мережі.

$d = \frac{G_Σ}{\omega C_Σ}$ – відносна сумарна активна провідність фаз мережі відносно землі.

У нормальному стані електричної мережі активної провідності фаз щодо землі набагато менше ємнісних провідностей $(б_G << б_C)$ і тому практично абсолютна величина напруги зсуву нейтралі рівна

$$U_{Nсм} = E_Ф \frac{\alpha_C}{\sqrt{d^2+1}}, \qquad (3.2)$$

у кабельних мережах коефіцієнт несиметрії, а, отже, і $U_{Nсм}$, зневажливо малі, тому що фази кабелю розташовані симетрично щодо його броні. У повітряних мережах ємності C_A, C_B, C_C не строго однакові навіть при транспонуванні проводів. Тому для них коефіцієнт несиметрії рівний 0,005÷0,02. Наявність на нейтралі напруги $\dot{U}_N$ (рис. 3.2, а) приводить до того, що напруги фаз відносно землі становляться нерівними по значенню та куту зсуву між ними відмінний від 120 електричних градусів. Струми I_A, I_B, I_C, обумовлені провідностями фаз мережі, також утворюють несиметричну зірку.

3.2. Режим сталого замикання на землю

У незаземлених мережах замикання на землю можуть бути сталими або дуговими. Стійкі замикання у свою чергу розділяють на металеві замикання й замикання через перехідний опір, який позначимо $R_п$. Цим опором може бути опір тліючої ізоляції, опір розтіканню струму в землі.

Розглянемо режим стійкого замикання фази А. Для цього режиму слушне співвідношення

$$\left(\dot{E}_A + \dot{U}_N\right)G_П + \left(\dot{E}_A + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_A + \left(\dot{E}_B + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_B + \left(\dot{E}_C + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_C = 0, \qquad (3.3.)$$

де $G_П = \frac{1}{R}$ – провідність в місці замикання.

Вирішив (3.3.) відносно $\dot{U}_N$, отримаємо

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_Ф\left(\frac{G_П}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П} + \frac{\underline{Y}_A + a^2\underline{Y}_B + a\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П}\right).$$

При визначенні напруги на нейтралі в режимі однофазного замикання можна зневажити можливою несиметрією фаз мережі, тобто вважати $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_Ф$. При цьому

$$\frac{\underline{Y}_A + a^2\underline{Y}_B + a\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П} = 0.$$

Отже,

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_Ф\frac{G_П}{3\underline{Y}_Ф + G_П}. \qquad (3.4)$$

Перетворимо (3.4) до виду

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_Ф\frac{1}{1 + R_П(3G_Ф + 3j\omega C_Ф)}, \qquad (3.5)$$

де $G_Ф = G_A = G_B = G_C$, $C_Ф = C_A = C_B = C_C$.

Відношення абсолютного значення напруги на нейтралі по (3.5) к його значенню при $R_п = 0$ прийнято називати коефіцієнтом повноти замикання

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 + 3G_Ф R_П)^2 + (3\omega C_Ф R_П)^2}}.$$

З (3.5) випливає, що напруга на нейтралі збільшується по мірі зменшення опору в місці ушкодження. При $R_п = 0$ напруга на нейтралі має максимальне значення, рівна фазній Е.Р.С. напруги фаз щодо землі при однофазнім замиканні можуть бути визначені в такий спосіб:

- напруга фази А

$$\dot{U}_A = \dot{U}_N + \dot{E}_A = \dot{E}_\Phi \frac{3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}{1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}; \quad (3.6)$$

- напруги неушкоджених фаз В та С

$$\dot{U}_B = \dot{U}_N + \dot{E}_B = \dot{E}_\Phi \frac{a^2\left(1+3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi\right) - 1}{1+3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi};$$
$$\dot{U}_C = \dot{U}_N + \dot{E}_C = \dot{E}_\Phi \frac{a\left(1+3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi\right) - 1}{1+3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}. \quad (3.7)$$

Векторна діаграма напруг при замиканні фази А на землю представлена на рис. 3.2, б. Як видне з діаграми й зі співвідношень (3.5) – (3.8), при $R_п = 0$ (вектори проведені суцільними лініями) напруга нейтралі за абсолютним значенням рівно фазної Е.Р.С., а напруга неушкоджених фаз щодо землі рівні міжфазній напрузі $\left(\sqrt{3}E_\Phi\right)$.

По мірі збільшення опору в місці замикання напруга нейтралі зменшується. При цьому кінець вектора $\dot{U}_N$ переміщається по півкола. Вектори напруг неушкоджених фаз, рівні сумі векторів відповідних фаз Е.Р.С. і напруги нейтралі, так само сковзають по півколах. На діаграмі пунктиром показане положення векторів для випадку, коли опір у місці замикання рівно сумарному ємнісному опору мережі відносно землі $R_\Pi = 1/3\omega C_\Phi$. Трикутник міжфазних напруг залишається незмінним, тобто замикання фази на землю не впливає на роботу приєднаних приймачів енергії.

На рис. 3.3 показане як змінюються напруги на нейтралі й фазах мережі при зміні опору в місці замикання, вираженого в частках від еквівалентного ємнісного опору мережі відносно землі $R_{П*} = R_\Pi 3\omega C$ Усі напруги також представлені у відносних одиницях при базисній напрузі, дорівнюють E_Φ.

Криві на рис. 3.3 побудовані на основі формул (3.5) – (3.7). При цьому прийняте, що активний опір ізоляції фаз нескінченно велике, тобто $G_\Phi = 0$, З рис. 3.3 випливає, що при деякім значенні $R_{П*}$ напруга на одній з неушкоджених фаз може трохи перевищити лінійну напруга.

Далі визначимо струм у місці замикання. Згідно зі схемою на рис. 3.1.

$$\dot{I}_з = -\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C = -\left(\dot{E}_A + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_Ф - \left(\dot{E}_B + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_Ф - \left(\dot{E}_C + \dot{U}_N\right)\underline{Y}_Ф = \\ = -\left(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C + 3\dot{U}_N\right)\underline{Y}_Ф. \qquad (3.8)$$

В (3.8) підставимо $\dot{U}_N$ по (3.5.) та врахуємо, що $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ В результаті отримуємо

$$\dot{I}_з = \frac{\dot{E}_Ф}{R_П + \dfrac{1}{3G_Ф + 3j\omega C_Ф}}. \qquad (3.9)$$

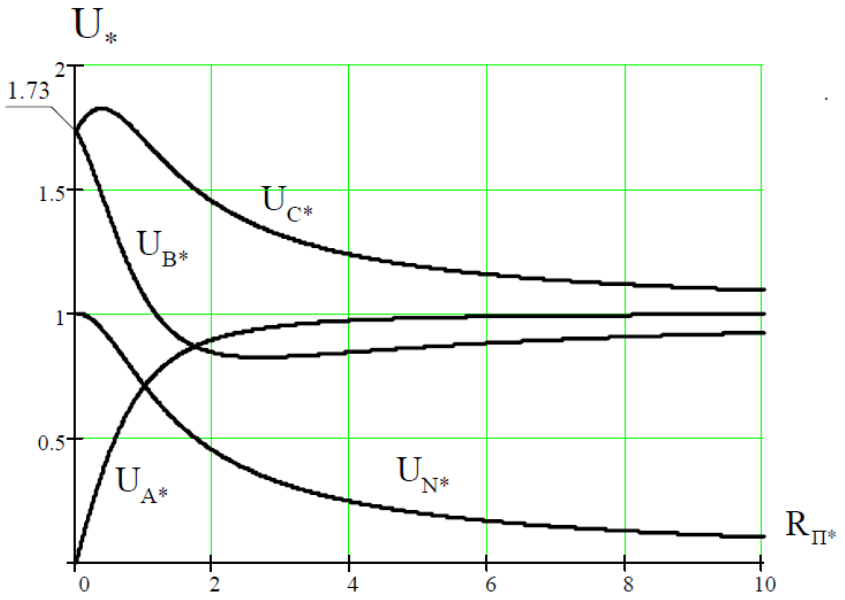


Рис. 3.3 - Напруги на нейтралі й фазах мережі

Формулі (3.9) відповідає схема заміщення нульовий послідовності, наведена на рис. 3.4. На рис. 3.5 показане, як змінюється модуль відносного значення струму замикання $I_{з*} = I / I_{зR=0}$ в залежності від $R_{П*}$. Тут $I_{зR=0}$ - струм замикання при $R_П = 0$.

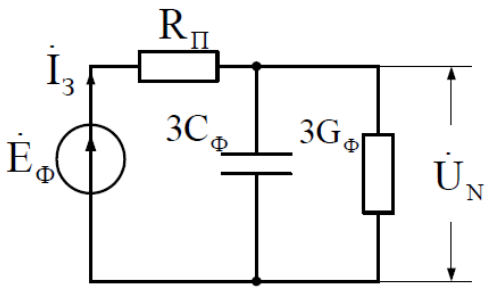


Рис. 3.4 - Схема заміщення нульової послідовності мережі із замкненої на землю фазою

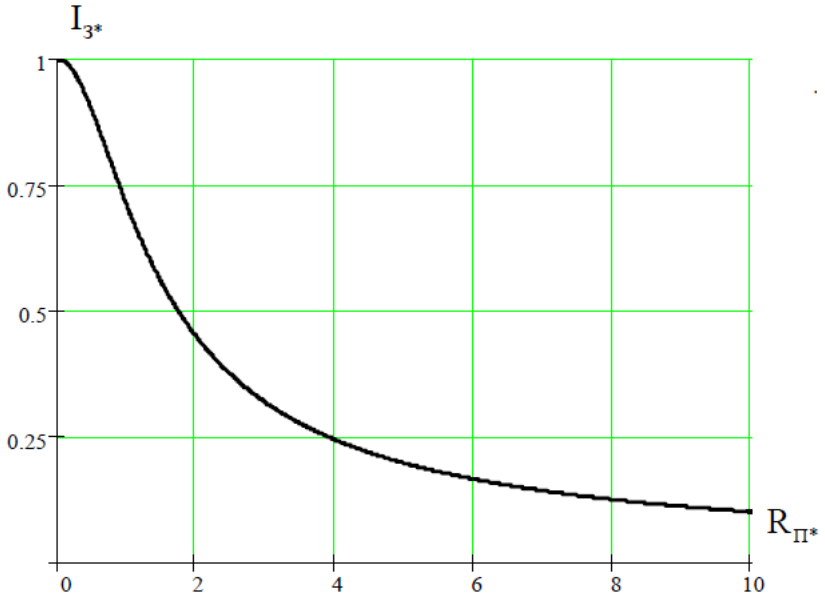


Рис. 3.5 - Струм замикання

Струм замикання Із може бути представлений у вигляді суми двох складових: ємнісної $\dot{I}_c$ та активної $\dot{I}_a$. В якості величин, що характеризують параметри конкретної мережі, використовуються ці струми при металевому замиканні ($R_П = 0$).

$$\dot{I}_{зR=0} = \dot{E}_Ф 3j\omega C_Ф + \dot{E}_Ф 3G_Ф = \dot{I}_c + \dot{I}_a .$$

Використовуючи введене раніше відносне значення сумарної активний провідності фаз мережі (d), абсолютне значення струму замикання при $R_П = 0$ можна виразити наступним чином

$$I_{зR=0} = E_Ф 3\omega C_Ф \sqrt{1 + d^2} .$$

3.3. Режим дугового замикання на землю

3.3.1. Загальні відомості про дугу змінного струму

Для вивчення електричних процесів при дугових замиканнях, зокрема з метою виявлення можливих перенапруг, необхідно прийняти деяку модель дугового замикання у відповідних схемах заміщення електричної мережі.

Електрична дуга – це сильно іонізований стовп газу, що став провідним під впливом високої температури. Висока провідність стовбура дуги, близька до провідності металів, пояснюється головним чином термічною іонізацією, тобто розпадом молекул газу на електрони й іони внаслідок високої температури. Поряд з іонізацією в плазмі йдуть процеси деіонізації, а саме рекомбінація й дифузія іонів і електронів.

Якщо швидкість іонізації дорівнює швидкості деіонізації, то дуга буде стійкої. Якщо якийсь із процесів переважає, дуга буде нестійкою.

Для розв'язку завдання моделювання дуги в електричній схемі заміщення необхідно враховувати динамічну вольт-амперну характеристику дуги, яка має місце при змінному струмі (рис. 3.6).

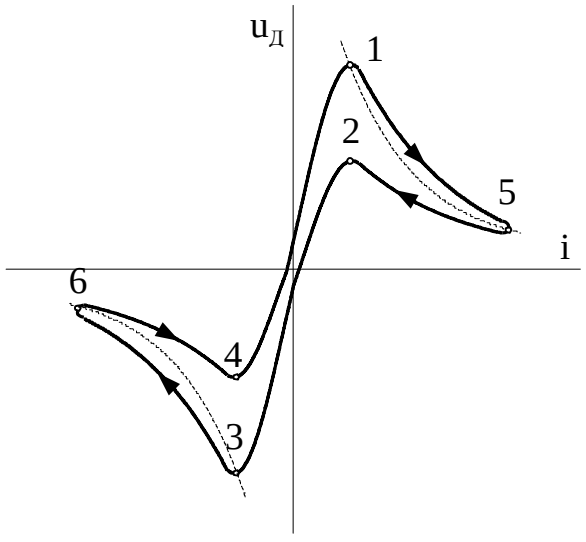


Рис. 3.6 - Динамічна вольт-амперна характеристика дуги

Як видно, на ділянках 1 – 5, 5 – 2, 3 – 6, 6 – 4 дуговий проміжок має негативний опір. Це пояснюється тим, що температура газу дугового стовпа

відіграє досить значну роль у процесах іонізації й деіонізації дугової плазми, тому що при спаді температури утвір нових іонів у дуговому стовпі різко зменшується й підсилюється деіонізація, що раніше утворювалися.

У деяких дослідженнях, показано, що температура газу й діаметр дугового стовпа дуги змінного струму ідуть за зміною струму з деяким невеликим запізнюванням, яке тем менше, чим інтенсивніше зовнішні деіонізуючі фактори, наприклад, швидкість повітряного потоку при відкритій дузі. Сукупність відмічених обставин приводить до різкого підвищення провідності дугового стовпа з ростом струму й зниженню провідності з зменшенням струму.

На ділянках 2 – 3 і 1 – 4 термічна іонізація різко знижується, провідність стовпа дуги зменшується швидше, чим знижується струм, особливо при наявності факторів, що сприяють інтенсивній деіонізації.

Вид залежності напруги на дузі при зміні струму у функції часу за таких умов показаний на рис. 3.7.

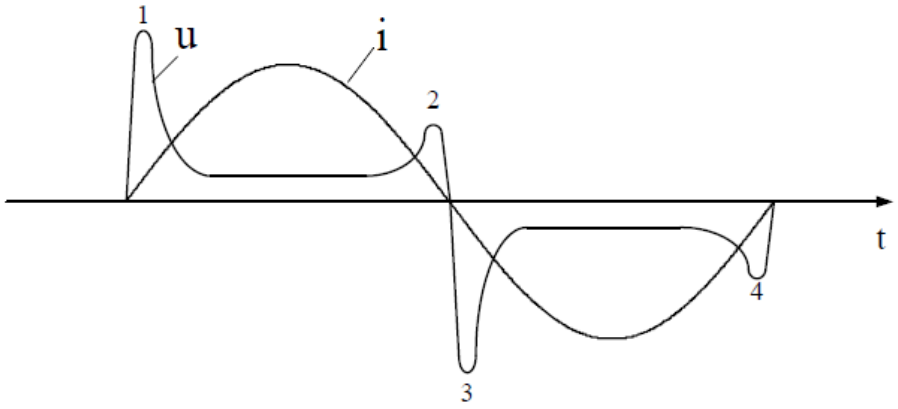


Рис. 3.7 - Залежність напруги на дузі від часу

При підході струму до нуля дуговий стовп являє собою досить тонкий шнур, який здатний зруйнуватися в дуже короткий відрізок часу (кілька десятків мікросекунд). У таких умовах дуга кожний півперіод як би гаситься й запалюється. При інтенсивній деіонізації напруга на дузі на початку півперіоду утворює різко виражений пік. Наявність такого піка вказує на те,

що під час проходу струму через нуль дуговий стовп придбав значну електричну міцність. Процеси, що мають місце при проході струму через нуль, мають першорядне значення з погляду її вгасання, розглянемо докладніше їхню фізичну сутність.

При кожному проході струму через нуль дуговий проміжок набуває більшу або меншу електричну міцність (залежно від умов деіонізації), але разом із цим на проміжку встановлюється напруга, обумовлена електричними процесами в мережі. Наступить загасання дуги або дуга загориться знову залежить від того, що швидше відновлюється – електрична міцність проміжку або напруга на ньому.

Графічне пояснення сказаного представлене на рис. 3.8, де цифрою 1 позначена крива відновлення напруги на проміжку після проходження струму через нуль, а криві 2 і 3 представляють різні випадки відновлення електричної міцності проміжку. При відновленні електричної міцності по кривій 2 виникає повторне запалювання дуги в момент часу t_1, а при відновленні по кривій 3 повторного запалювання дуги не відбувається.

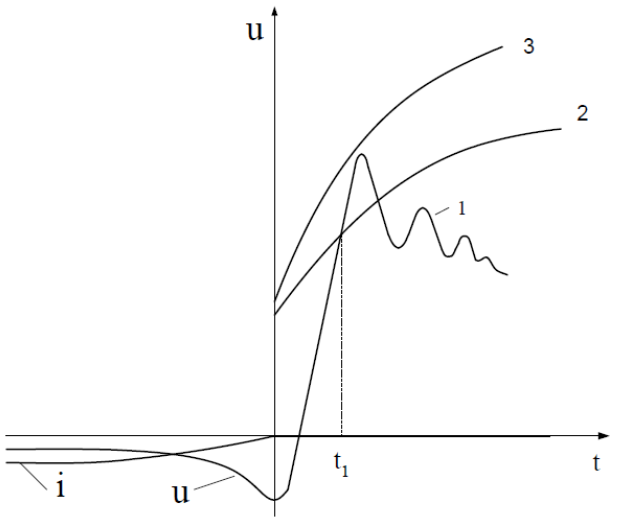


Рис. 3.8 - Можливе взаємне розташування кривих напруги, що відновлюється, і електричної міцності проміжку

Тому що сумарна напруга на дузі протягом повного напівперіоду зміни

струму порівняно мало, а процес гасіння дуги в навкіллях нульового значення струму відбувається протягом досить малого часу, тому дуговий проміжок у схемах заміщення можна представити приблизно у вигляді ідеального ключа, який замикається при досягненні напругою значення, рівного пробивному, а розмикається при проходженні струму через нуль.

Важливо звернути увагу на те, що внаслідок теплової інерції дугового стовпа умови загасання дуги при підході струму до нульового значення залежить від швидкості зміни струму або від його частоти. Таким чином, при високій частоті загасання дуги можна чекати лише при наявності умов досить сильної деіонізації, а при низькій частоті – при слабкій деіонізації.

Як буде видне з подальшого, струм у місці замикання (у дузі) на різних стадіях процесу може мати частоти, що відрізняються в десятки раз.

Тому що інтенсивність деіонізації дуги в місці замикання має випадковий характер, то необхідно враховувати, що дуга може гаснути як при проході струму через нуль на стадії, коли струм має високу частоту, так і на стадії, коли його частота більш низька.

3.3.2. Перехідні процеси при пробої фази на землю й обриві дуги

У мережах з ізольованої нейтраллю можуть мати місце як сталі заземлюючі дуги, що так і перемежовуються. Характер дуги залежить від величини струму замикання й конкретних умов, у яких вона виникла. Замикання через стійку дугу еквівалентно замиканню через невеликий активний опір. Перемежованої називається дуга, у процесі горіння якої мають місце наступні друг за другом пробої дугового проміжку (запалювання дуги) і загасання дуги. Перемежована дуга викликає перехідні процеси, що виникають при кожнім запалюванні й загасанні дуги. Перехідний процес після кожного чергового загасання дуги обумовлює початкові умови перехідного процесу при наступнім запалюванні дуги. Певна комбінація умов горіння дуги й параметрів мережі можуть привести до виникнення

значних перенапруг.

Розглянемо характер перехідних процесів при пробої ізоляції (наприклад фази А) на землю й наступному обриві дуги, використовуючи спрощену схему трифазної симетричної мережі з ізольованої нейтраллю (рис. 3.9), у якій вважаємо

$$C_A = C_B = C_C = C_Ф,\ C_{AB} = C_{BC} = C_{AC} = C_{МФ},\ L_A = L_B = L_C = L_Ф \qquad (3.10)$$

де $C_{МФ}$ і $C_Ф$ – міжфазна й фазна ємності,

$L_Ф$ – еквівалентна індуктивність джерела живлення, що визначається разом з іншими параметрами кількісні характеристики перехідних процесів.

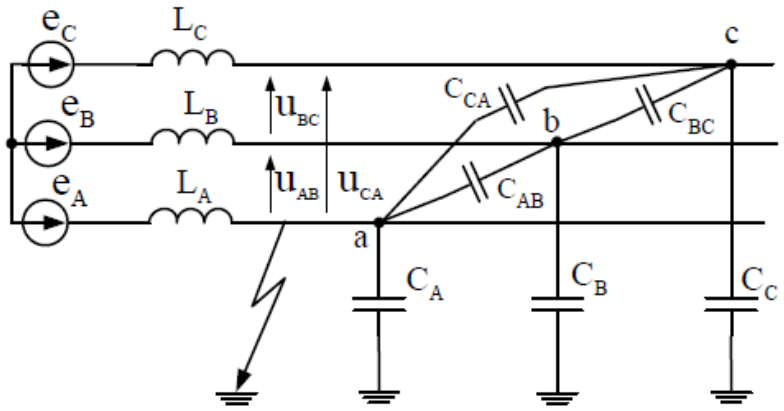


Рис. 3.9 - Схема заміщення мережі з ізольованої нейтраллю

Для спрощення аналізу перехідного процесу також зробимо наступні припущення. По-перше, до моменту запалювання дуги будемо вважати напруги на фазах рівними Е.Р.С. джерела. По-друге, приймемо, що постійна часу перехідного процесу розряду ємності пошкодженої фази C_A досить мала й тому напруга на цій фазі в момент замикання знижується до нуля практично миттєво.

Основна мета подальшого розгляду перехідних процесів полягає в тому, щоб виявити умови, при яких на не пошкоджених фазах формуються підвищені напруги.

Напруги на неушкоджених фазах при стійкому металевому замиканні

стають рівними міжфазним напругам у відповідності з (3.7) і (3.8). Перехідний процес від напруг нормального режиму (початкових напруг $u_{нач}$) до напруг, що мають місце при стійкім замиканні (примушеним напругам $u_{пр}$), у загальному випадку може мати характер загасаючих коливань (рис. 3.10).

Цей процес на фазах У и С із деякими допущеннями описується наступними вираженнями

$$u_B = u_{Bпр} + \left[u_{Bнач}(t_1) - u_{Bпр}(t_1)\right] e^{-\delta_1 (t-t_1)} \cos\omega_1 (t - t_1), \quad (3.11)$$

$$u_C = u_{Cпр} + \left[u_{Cнач}(t_1) - u_{Cпр}(t_1)\right] e^{-\delta_1 (t-t_1)} \cos\omega_1 (t - t_1), \quad (3.12)$$

де ω_1 – частота вільних коливань,

δ_1 – коефіцієнт загасання вільних коливань.

Величини у квадратних дужках в (3.11), (3.12), рівні різницям між початковими й примушеними значеннями напруг на неушкоджених фазах у момент запалювання дуги ($t = t_1$), є початкові амплітуди вільних коливань. Через половину періоду вільних коливань $\left(\frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}\right)$ у момент часу t миттєве значення напруга досягає свого максимуму u_{BM} (рис. 3.10). Завдання полягає в тому, щоб, з урахуванням реальних параметрів мережі, знайти можливе значення цього максимуму. На цьому етапі розгляду питання оборотний увага на те, що за інших рівних умов значення максимуму напруги при перехідному процесі залежить, головним чином, від різниці між початковим і примушеним значеннями напруг у момент t_1, від значення примушеного напруги в момент t_2 і від ступеня загасання вільних коливань до моменту t_2.

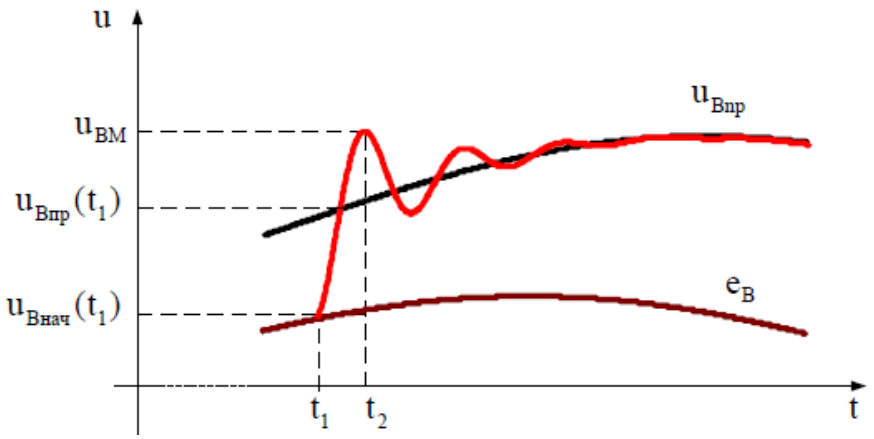


Рис. 3.10 - Зміна напруги на неушкодженій фазі при пробої ізоляції (запалюванні дуги)

При визначенні максимальних розрахункових перенапруг доцільно використовувати не коефіцієнт загасання δ_1, а коефіцієнт, дорівнює відносному зменшенню амплітуди за половину періоду вільних коливань. Тому що розрахункові перенапруги за інших рівних умов тим більше, чим менше δ_1, то при прийнятих далі розрахункових умовах значення показника ступені експонентної функції в (3.11), (3.12) у момент t_2 при $\delta_1 << \omega_1$.

$$\delta_1(t_2 - t_1) = \frac{\delta_1 T_1}{2} = \frac{\delta_1}{\omega_1}\pi << 1.$$

Тому величину вити у вигляді $e^{-\frac{\delta_1}{\omega_1}\pi}$ розкладанням у ступеневий ряд можна представити у вигляді

$$e^{-\frac{\delta_1}{\omega_1}\pi} \approx 1 - k_{\delta_1}, \qquad (3.13)$$

де $k_{\delta_1} = \frac{\delta_1}{\omega_1}\pi$.

Початкова амплітуда вільних коливань може бути візначена досить просто, якщо взяти до уваги, що при неврахуванні міжфазних ємностей різниця між початковими й примушеними напругами на неушкоджених фазах у момент запалювання дуги завжди дорівнює напрузі ушкодженої фази в цей момент часу. Це можна показати в такий спосіб. У будь-який момент

часу для напруги на фазах слушні співвідношення

$$\begin{aligned} u_A &= e_A + u_N, \\ u_B &= e_B + u_N, \\ u_C &= e_C + u_N, \end{aligned} \tag{3.14}$$

де u_n – напруга на нейтралі, яке в загальному випадку не рівно нулю.

У момент запалювання дуги на фазі А (момент t_1) напруги, що цікавлять нас, рівні:

– на ушкодженій фазі

$$u_A(t_1) = e_A(t_1) + u_N(t_1), \tag{3.15}$$

– примушені напруги на неушкоджених фазах

$$\begin{aligned} u_{Bпр}(t_1) &= -u_{AB}(t_1) = e_B(t_1) - e_A(t_1), \\ u_{Cпр}(t_1) &= u_{CA}(t_1) = e_C(t_1) - e_A(t_1), \end{aligned} \tag{3.16}$$

– початкові напруги на неушкоджених фазах

$$\begin{aligned} u_{Bнач}(t_1) &= e_B(t_1) + u_N(t_1), \\ u_{Cнач}(t_1) &= e_C(t_1) + u_N(t_1). \end{aligned} \tag{3.17}$$

З обліком того, що з (3.15) $u_N(t_1) = u_A(t_1) - e_A(t_1)$, різниця між начальними та вимушеними напругами непошкоджених фаз в момент t_1.

$$\begin{aligned} u_{Bнач}(t_1) - u_{Bпр}(t_1) &= u_A(t_1), \\ u_{Cнач}(t_1) - u_{Cпр}(t_1) &= u_A(t_1). \end{aligned} \tag{3.18}$$

Покажемо далі, що наявність міжфазних ємностей приводить до деякої зміни початкової амплітуди вільних коливань. Як випливає із схеми мережі (рис. 3.9), при замиканні, наприклад фази А, ємність фази В (C_B) з'єднується паралельно з міжфазною ємністю (C_{AB}), а ємність фази З (C_C) – з міжфазною ємністю (C_{CA}). У результаті цього починається швидко протікаючий (практично миттєвий) перехідний процес вирівнювання напруг на паралельно з'єднаних ємностях. Тому на неушкоджених фазах напруги стрибкоподібно міняються і їх нові початкові значення можна визначити виходячи з того, що сумарний заряд пар ємностей (C_B, C_{AB} і C_C, C_{CA}) не може змінитися миттєво. Безпосередньо перед запалюванням дуги сумарний заряд ємностей C_B рівний

C_{AB}

$$Q_B = C_B u_B(t_1) + C_{AB} u_{AB}(t_1), \tag{3.19}$$

а ємностей C_C та C_{CA}

$$Q_C = C_C u_C(t_1) + C_{CA} u_{CA}(t_1). \tag{3.20}$$

Після запалювання дуги заряди відповідно рівні

$$Q_B = u_{Внач}(t_1) \cdot (C_B + C_{AB}), \tag{3.21}$$

$$Q_C = u_{Снач}(t_1) \cdot (C_C + C_{CA}). \tag{3.22}$$

Дорівнюючи попарно праві частини (3.19), (3.21) і (3.20), (3.22), з врахуванням того, що $u_{AB}(t_1) = u_A(t_1) - u_B(t_1)$ та $u_{CA}(t_1) = u_C(t_1) - u_A(t_1)$, визначимо начальні значення напруги на фазах В та С.

$$u_{Внач}(t_1) = u_B(t_1) - u_A(t_1)\frac{C_{AB}}{C_B + C_{AB}}, \tag{3.23}$$

$$u_{Снач}(t_1) = u_C(t_1) - u_A(t_1)\frac{C_{CA}}{C_C + C_{CA}}, \tag{3.24}$$

Тоді різниця між початковими й примушеними напругами рівна

$$u_{Внач}(t_1) - u_{Впр}(t_1) = u_A(t_1)(1 - k_C), \tag{3.25}$$

$$u_{Снач}(t_1) - u_{Спр}(t_1) = u_A(t_1)(1 - k_C), \tag{3.26}$$

де $k_C = \frac{C_{AB}}{C_B + C_{AB}} = \frac{C_{CA}}{C_C + C_{CA}} = \frac{C_{МФ}}{C_Ф + C_{МФ}}$.

Коефіцієнт $к_C$ характеризує вплив міжфазних ємностей.

Звичайно $C_{МФ}$ = (0,25 ÷ 0,3) $C_Ф$, тобто k_C = (0,2 ÷ 0,23). У розрахунках далі приймається k_C = 0,2.

Вплив міжфазних ємностей на початкову амплітуду вольт-амперних коливань напруги неушкоджених фаз показаний на рис. 3.11.

Напруга на ушкодженій фазі в момент чергового запалювання дуги в загальному випадку визначається миттєвим значенням Е.Р.С. джерела та напругою на нейтралі. Під час горіння дуги ua = 0, тому напруга на нейтралі,

як напруга нульової послідовності дорівнює

$$u_N = \frac{1}{3}\left(u_B + u_C\right). \qquad (3.27)$$

З (3.27) випливає, що характер перехідного процесу на нейтралі такий же, як і на неушкоджених фазах, а його інтенсивність визначається різницею початкового й примушеного напруг на нейтралі. У момент замикання в силу співвідношення (3.27) напруга на нейтралі також перетерплює стрибок і стає рівним

$$u_{Nнач} = \frac{1}{3}\left(u_{Bнач} + u_{Cнач}\right). \qquad (3.28)$$

Примушена напруга на нейтралі u_{nnp}, як це випливає з (3.15), дорівнює $u_{Nпр} = -e_A$, а в момент запалювання дуги $u_{Nпр}(t_1) = -e_A(t_1)$. Таким чином, початкова амплітуда вільних коливань на нейтралі рівна різниці $\left[u_{Nнач}(t_1) - u_{Nпр}(t_1)\right]$.

Для кількісної оцінки можливих перенапруг необхідно знати значення частоти вільних коливань ω_1 і коефіцієнта загасання δ_1.

Частоту вільних коливань ω_1 можна визначити за схемою рис. 3.12, яка отримана з урахуванням тієї обставини, що перехідний процес під час горіння дуги в неушкоджених фазах B та C проходить синхронно й крапки b і зі стосовно вільних складових можна вважати крапками рівного потенціалу.

У результаті, з урахуванням допущення (3.10), схему заміщення мережі із ізольованою нейтраллю (рис. 3.9) можна представити як коливальний контур (рис. 3.12), де R_{EKB}, L_{EKB} – відповідно еквівалентний активний опір і еквівалентний індуктивність коливального контуру.

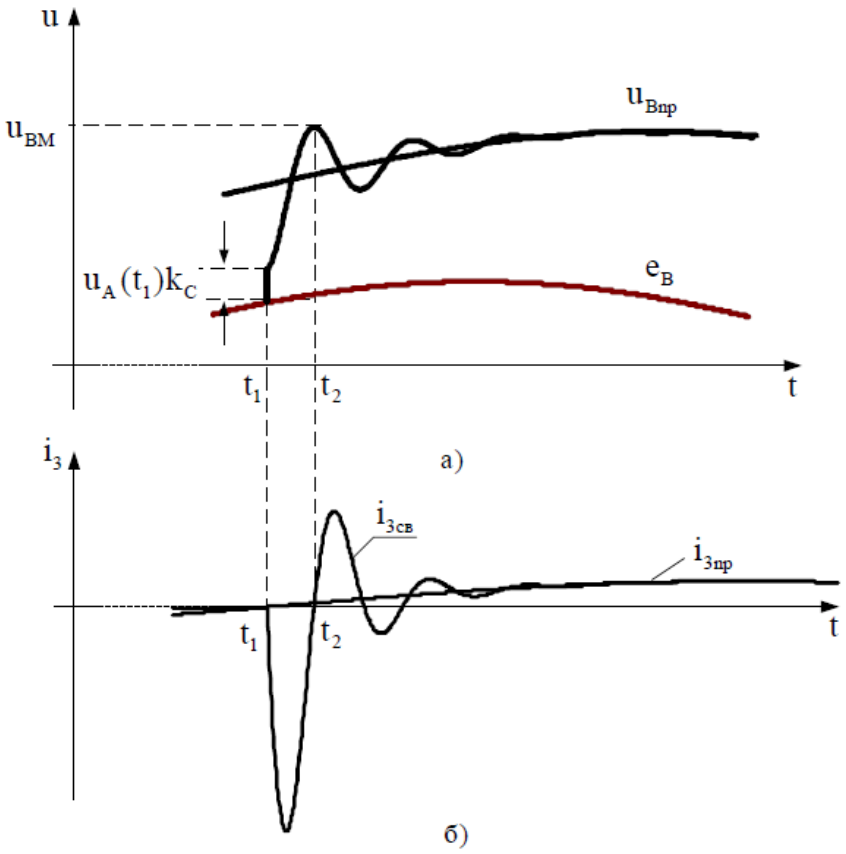


Рис. 3.11 - а) – вплив міжфазних ємностей на початкову амплітуду вільних коливань; б) – струм у місці замикання

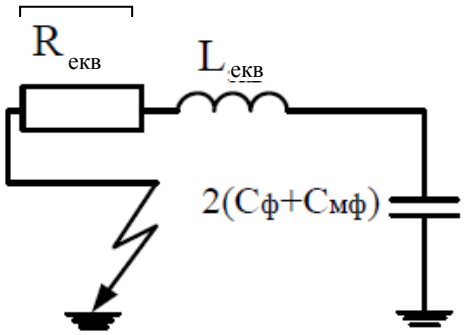


Рис. 3.12 - Схема заміщення для визначення параметрів перехідного процесу

Враховуючи також, що далі для одержання максимально можливих перенапруг перехідний процес уважається слабко загасаючим, можна прийняти частоту вільних коливань рівної резонансної частоти даного контуру. Отже,

$$\omega_1 = 1/\sqrt{L_{экв}\,2(C_Ф + C_{МФ})}\,. \qquad (3.29)$$

Реальні параметри електричних мереж такі, що частота вільних коливань $f_1 = \omega_1 / 2\pi$ може перебувати в межах 500÷3000 Гц.

Загасання вільної складової обумовлене активним опором у ланцюзі струму замикання на землю Rекв, яке складається із опорів струмоведучих проводів, опору в місці пошкоджень й опору шляху повернення струму замикання. Коефіцієнт затухання вільної складовій визначається в такий спосіб

$$\delta_1 = \frac{R_{екв}}{2L_{екв_1}}. \qquad (3.30)$$

У повітряних високовольтних мережах опір R екв може змінюватися в широких межах залежно від характеру ушкодження. При ушкодженні ізоляторів на дерев'яних опорах може досягати декількох МОм. Якщо ушкодження опору на металевій або залізобетонній опорі, то R екв представляє собою величину, рівну сумі опору заземлюючої дуги, опору розтіканню струмів заземлювача опори й опору всієї довжини зони землі, охопленої зворотними струмами. У кабельних мережах близько 90% зворотного струму протікає по оболонках кабелів. У прилягаючий до кабелів ґрунт, навіть при його значній питомій провідності, може відгалужуватися лише незначна частина зворотного струму, тому що з видаленням його від кабелю, по якім протікає прямий струм до місця ушкодження, значно зростає власна індуктивність петлі струму.

Як зазначено вище, загасання вільної складової напруги при розрахунках перенапруг визначається через коефіцієнт $k\delta_1$ (3.13).

По даним експериментальних осцилографічних досліджень в повітряних мережах $k\delta_1$ =0,2 ÷ 0,5, у кабельних мережах $k\delta_1$ =0,2 ÷ 0,8. Звичайно для розрахунків максимально можливих перенапруг ухвалюють із запасом $k\delta_1$= 0,1.

Після загасання дуги в загальному випадку також мають місце перехідні процеси. Для розв'язку завдання визначення можливих перенапруг

важливо на цьому етапі розглянути перехідні процеси зміни напруги на нейтралі й на ушкодженій фазі. Після обриву дуги в який-небудь момент (наприклад у момент t_2) на нейтралі залишається напруга, яка відповідно до (3.27) рівно

$$u_N(t_2) = \frac{1}{3}\left[u_B(t_2) + u_C(t_2)\right]. \qquad (3.31)$$

Напруга $u_N(t_2)$по (3.31) є початкова напруга на нейтралі для перехідного процесу після гасіння дуги, а його примушене значення дорівнює нулю.

Характер перехідного процесу зміни напруги на нейтралі після загасання дуги вирішальним образом залежить від опору в ланцюзі нейтралі. У мережі з ізольованої нейтраллю надлишкові заряди на фазах дуги, що нагромадилися за час горіння, що й визначають, остаточну напругу на нейтралі, можуть стікати через кінцевий опір ізоляції фаз щодо землі й через первинні обмотки трансформаторів напруги, нейтралі яких заземлені. Постійна часу перехідного процесу стікання надлишкових зарядів у цьому випадку може бути досить великою, тому напруга на нейтралі за час декількох циклів запалювання й загасання дуги практично може залишатися незмінним. Саме така умова ухвалюється при визначенні максимально можливих розрахункових перенапруг у мережі з ізольованої нейтраллю.

Основним позитивним ефектом застосування резистивного заземлення нейтралі або заземлення через дугогасильний реактор є одержання визначеного в якісному і кількісному відношенні перехідного процесу для напруги на нейтралі після загасання дуги.

Далі розглянемо перехідний процес зміни напруги на ушкодженій фазі після загасання дуги. Цей процес, як правило, також має вигляд загасаючих коливань, а його інтенсивність, визначається різницею початкового й примушеного значень напруги в момент загасання дуги. Примушена напруга дорівнює сумі напруг джерела й залишкової напруги на нейтралі, а початкове – дорівнює нулю.

Перехідний процес відновлення напруги на ушкодженій фазі для деякого загального випадку показаний на рис. 3.13 і може бути описаний наступним співвідношенням

$$u_A = u_{Anp} - u_{Anp}(t_2)e^{-\delta_2(t-t_2)}\cos\omega_2(t-t_2). \qquad (3.32)$$

Тому що $u_{Anp} = e_A + u_N$,

$$u_A = e_A + u_N - \left[e_A(t_2) + u_N(t_2)\right]e^{-\delta_2(t-t_2)}\cos\omega_2(t-t_2). \qquad (3.33)$$

В (3.33) ω_2, δ_2 відповідно частота вільних коливань і коефіцієнт загасання процесу відновлення напруги.

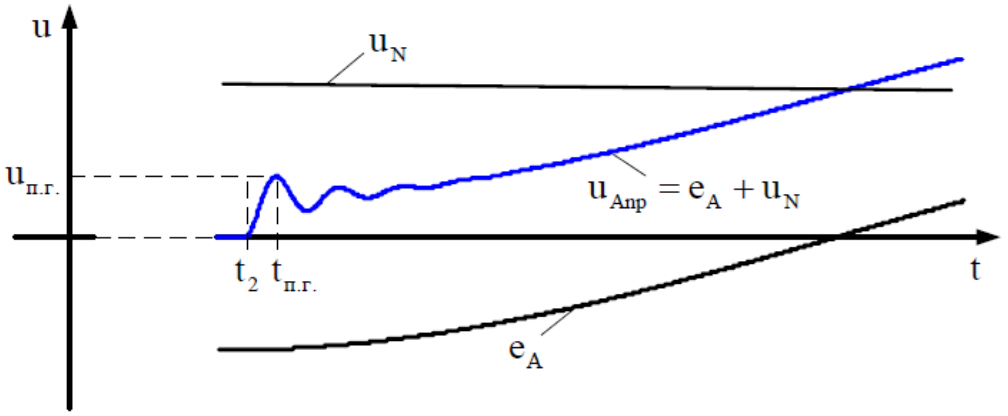


Рис. 3.13 - Перехідний процес відновлення напруги на ушкодженій фазі

Ці параметри відрізняються від аналогічних величин при замиканні фази на землю, але їх можливі значення частоти лежать у тих же межах, що й значення частоти ω_1 і значення коефіцієнта загасання δ_1.

Через час, рівне півперіоду коливань із частотою ω_2 $\left(\frac{T_2}{2} = \frac{\pi}{\omega_2}\right)$ напруга, що відновлюється, досягає свого максимального значення ($u_{п.г.}$), яке в деяких джерелах назване піком гасіння (рис. 3.13).

Для визначення напруги піка гасіння при відновленні напруги на ушкодженій фазі, також як і при розгляді перехідного процесу при горінні дуги, можна використовувати коефіцієнт, дорівнює відносному зменшенню амплітуди за половину періоду вільних коливань, тобто прийняти

$$e^{-\frac{\delta_2}{\omega_2}\pi} \approx 1 - k_{\delta_2},$$

де – $k_{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\omega_2}\pi$.

Коефіцієнт kδ2 може бути приблизно такого ж порядку як kδ1. Приймемо для розрахунків kδ2 = 0,1.

При горінні дуги в місці замикання протікає струм, який тримає примушену складову промислової частоти й вільні складові, які обумовлені: зміною заряду ємностей неушкоджених фаз, розрядом ємності ушкодженої фази, обміном зарядами міжфазних і фазних ємностей при вирівнюванні їх напруг. При прийнятих вище допущеннях дві останні складові, внаслідок швидкого загасання, далі не враховуються й струм у місці замикання визначається сумою струмів, що протікають через фазні ємності неушкоджених фаз В та С

$$\iota 3 = \iota 3B + \iota 3X \qquad (3.34)$$

Струми в (3.34) можуть бути визначені по відомих напругах фаз у такий спосіб

$$i_{3B} = C_\Phi \frac{du_B}{dt}, \quad i_{3C} = C_\Phi \frac{du_C}{dt}.$$

З обліком (3.11), (3.12) і (3.25), (3.26) одержимо

$$i_3 = C_\Phi \frac{d}{dt}\left[u_{Bпр} + u_{Cпр}\right] + 2C_\Phi u_A(t_1)(1-k_C)\frac{d}{dt}\left[e^{-\delta_1 t}\cos\omega_1(t-t_1)\right]. \qquad (3.35)$$

Далі врахуємо, що $u_{Bпр} + u_{Cпр} = e_B + e_C - 2e_A$, $e_B + e_C = -e_A$. Якщо $e_A = E_{\Phi m}\sin\omega t$, то

$$\begin{aligned} i_3 &= -3\omega C_\Phi E_{\Phi m}\cos\omega t - \\ &-2C_\Phi u_A(t_1)(1-k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)}\left[\delta_1\cos\omega_1(t-t_1) + \omega_1\sin\omega_1(t-t_1)\right]. \end{aligned} \qquad (3.36)$$

В (3.36) перша складова – примушений ємнісний струм замикання промислової частоти, друга – перехідний ємнісний струм. Рівняння для вільної складової перехідного струму в місці замикання одержимо шляхом подальшого спрощення вираження (3.36), урахувавши реальні співвідношення між δ_1 і ω_1.

Наприклад, при частоті вільних коливань f_1 = 1000 Гц і $k\delta_1$=0,1 ω_1 = 6280 рад/с, а коефіцієнт загасання δ_1 = 210 1/с. Тому що $\delta_1 << \omega_1$ можна прийняти, що

$$i_{зсв} \approx -2\omega_1 C_Ф u_A(t_1) e^{-\delta_1(t-t_1)} \sin\omega_1(t-t_1). \quad (3.37)$$

Примушений ємнісний струм замикання промислової частоти по (3.36) рівний

$$i_{3пр} = -3\omega C_Ф E_{Фm} \cos\omega t. \quad (3.38)$$

Графік струму в місці замикання по (3.37), (3.38) представлений на рис. 3.11, б. Тому що $\omega_1 >> \omega$, те при малім загасанні амплітуда вільного струму в місці замикання значно перевершує амплітуду усталеному струму. Ця обставина досить важлива, тому що створює умови, при яких проходження сумарного струму замикання через нуль протягом перших періодів вільних коливань визначається вільним струмом, тобто дуга може згаснути в моменти часу: $T_{1/2}$; T_1; 3/2 T_1.

При переході струму через нуль має місце спроба гасіння, результат якої залежить від співвідношення між швидкостями відновлення електричної міцності дугового проміжку й напруги на ньому. Якщо дуга не згасне ні при першім проходженні струму замикання через нуль, ні в наступні моменти переходу, то вільні коливання загаснуть і всі величини приймуть значення змушених складових.

Якщо дуга згасне, наприклад, при першім проходженні струму замикання через нуль (у момент t_2), те знову буде мати місце перехідний процес, який накладається на, що ще не закінчився перехідний процес, викликаний попереднім замиканням на землю.

Після загасання вільних коливань відбувається більш повільний підйом напруги на ушкодженій фазі із частотою джерела.

Якщо загасання дуги є остаточним, то u_N через декілька періодів промислової частоти зменшується до нуля. Напруги на фазах стосовно землі

стануть рівними фазним Е.Р.С. джерела, тобто відновиться нормальний режим роботи мережі.

У випадку повторного пробою й наступного загасання дуги мають місце процеси, якісно подібні описаним раніше. Однак їх кількісні характеристики будуть іншими, тому що напруги на фазах при повторному пробої відрізняються від відповідних напруг при першому пробої, оскільки напруга на нейтралі не рівна нулю, як це було при першому пробої.

Далі розглянемо процеси при запалюванні й загасанні дуги при цілком певних умовах, що дозволить дати кількісну оцінку електричних величин, що цікавлять нас.

При аналізі перехідних процесів, що виникають при запалюванні й загасанні дуги, необхідно визначати миттєві значення напруги у певні моменти часу. Для цього врахуємо, що миттєві значення Е.Р.С. джерела для будь-якого моменту часу прийняті рівними

$$e_A = E_{\Phi m} \sin \omega t;$$
$$e_B = E_{\Phi m} \sin(\omega t + 240^0);$$
$$e_C = E_{\Phi m} \sin(\omega t + 120^0).$$

Примушені значення напруг фаз після закінчення періхідного процесу, викликаного запалюванням дуги між фазою А и землею, відповідно до векторної діаграми (рис. 3.2)

$$u_A = 0;$$
$$u_{Bпр} = -u_{AB} = e_B - e_A = \sqrt{3} E_{\Phi m} \sin(\omega t + 210^0);$$
$$u_{Cпр} = u_{CA} = e_C - e_A = \sqrt{3} E_{\Phi m} \sin(\omega t + 150^0).$$

Розглянемо перехідний процес при пробої ізоляції фази А на землю з наступним загасанням дуги. Нехай пробій відбувся в момент часу $t_1 = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\omega}$, тобто, коли напруга ушкодженої фази рівна

$$u_A(t_1) = -E_{\Phi m}.$$

По (3.25) і (3.26) різниця між початковими й примушеними напругами

на фазах У и С, тобто початкові амплітуди вільних коливань, будуть рівні

$$u_A(t_1) = -E_{\Phi m}.$$

Напруги на фазах В і С будуть змінюватися у відповідності з наступними співвідношеннями

$$u_B = u_{Bпр} - E_{\Phi m}(1-k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)}\cos\omega_1(t-t_1),$$

$$u_C = u_{Cпр} - E_{\Phi m}(1-k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)}\cos\omega_1(t-t_1).$$

Напруга на нейтралі відповідно до (3.27) рівно

$$u_N = \frac{1}{3}\left(u_{Bпр} + u_{Cпр}\right) - \frac{2}{3}E_{\Phi m}(1-k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)}\cos\omega_1(t-t_1).$$

З (3.27) випливає, що $\frac{1}{3}\left(u_{Bпр} + u_{Cпр}\right) = -E_{\Phi m}\sin\omega t$, тому

$$u_N = -E_{\Phi m}\sin\omega t - \frac{2}{3}E_{\Phi m}(1-k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)}\cos\omega_1(t-t_1).$$

Напруги на неушкоджених фазах і на нейтралі досягають максимального значення через половину періоду вільних коливань (момент t_2) від моменту запалювання дуги (момент t_1). У цей момент часу $\omega 1(t2 - t1) = \pi$, а $\cos \omega 1(t - t1) = -1$. Тому що частота вільних коливань ω_1 набагато більше робочої частоти ω, те цілком можна вважати, що за час $T_1/2 = \pi/\omega_1$ примушені складові практично не змінюються й прийняти їхніми рівними миттєвим значенням у момент t_1. При прийнятому моменті замикання $\omega t_1 = 270^0$ і тому по (3.36)

$$u_{Bпр}(t_1) = u_{Cпр}(t_1) = 1{,}5E_{\Phi m}.$$

Таким чином, після першого запалювання дуги максимальні напруги (U_{BM}, U_{CM}) на неушкоджених фазах і на нейтралі (U_{NM}) рівні

$$u_{BM} = u_{CM} = 1{,}5E_{\Phi m} + E_{\Phi m}\left(1-k_C\right)\left(1-k_{\delta_1}\right),$$

$$u_{NM} = E_{\Phi m} + \frac{2}{3}E_{\Phi m}\left(1-k_C\right)\left(1-k_{\delta_1}\right).$$

При $k_C = 0{,}2$ та $k_{\delta_1} = 0{,}1$ отримаємо

$$u_{BM} = u_{CM} = 2{,}22E_{\Phi m}; \quad u_{NM} = 1{,}48E_{\Phi m}.$$

Напруга піка гасіння визначається по (3.33) з обліком того, що пік гасіння наступає до моменту часу

$$t_{п.г.} = t_2 + \frac{T_2}{2} = t_2 + \frac{\pi}{\omega_2},$$

і тому

$$e^{-\delta_2(t_{п.г.}-t_2)} \approx (1-k_{\delta_2}) = 0,9, \quad \omega_2(t_{п.г.} - t_2) = \pi.$$

тоді

$$u_{п.г} = \left[e_A(t_2) + u_N(t_2)\right] - \left[e_A(t_2) + u_N(t_2)\right](1-k_{\delta 2})\cos\pi =$$
$$= \left(-E_{Фm} + 1,48E_{Фm}\right) - \left(-E_{Фm} + 1,48E_{Фm}\right)\cdot 0,9(-1) = 0,91E_{Фm}.$$

Для визначення струму в місці замикання скористаємося співвідношеннями (3.37), (3.38). Вільна складова перехідного струму в місці замикання по (3.37) рівна

$$i_{зсв} \approx 2\omega_1 C_Ф E_{Фm} \sin\omega_1(t - t_1).$$

Примушений ємнісний струм замикання промислової частоти по(3.38) рівний

$$i_{3пр} = 3C_Ф E_{Фm}\omega\cos\omega t.$$

На рис. 3.14 показані криві зміни напруг відносно землі для ушкодженої фази A(U_A) (рис. 3.14, а), неушкодженої фази B(U_B) (рис. 3.14, б), напруга на нейтралі U_N (рис. 3.14, в), а також струм замикання на землю – із (рис. 3.14, г). Суцільними лініями зображені криві напруг і струму при загорянні й наступному обриві дуги, через половину періоду вільних коливань емнісного струму, а пунктирними лініями криві при стійкім замиканні.

На рис. 3.14, а поряд з напругою, що відновлюється, наведені можливі криві, що відновлюється електричної міцності дугового проміжку, вид яких залежить від великого числа факторів, що важко враховуються. У випадку I електрична міцність проміжку відновлюється повільніше, чим напруга на ньому й дуга стає стійкою. У випадку II відбудеться загасання дуги в момент

часу t_2, але в момент t_3 дуга загориться знову. При такій ситуації має місце дугове замикання, яке прийнято називати перемежованим. Випадок III, коли електрична міцність проміжку протягом усього часу, що вище відновлюється напруги, відповідає остаточному загасанню дуги.

Отримані співвідношення є основою для визначення розрахункових максимальних перенапруг при повторюваних запалюваннях і загасаннях дуги.

3.3.3. Теорії формування перенапруг при дугових замиканнях на землю

Розроблено кілька теорій формування перенапруг на неушкоджених фазах при дугових замиканнях. Процес формування перенапруг відповідно до цих теорій викладені в ряді робіт. Значення перенапруг в остаточному підсумку залежить від залишкової напруги на нейтралі й від пробивної напруги в момент чергового запалювання дуги в процесі перемежованого замикання.

Три, відомі в цей час і розглянуті нижче, теорії виникнення перенапруг відрізняються прийнятими умовами горіння дуги, які й обумовлюють різні напруги на нейтралі до моменту чергового запалювання дуги. Загальним для всіх теорій є припущення про те, що електрична міцність дугового проміжку (пробивна напруга) до моменту кожного чергового пробою дорівнює максимальному значенню, що відновлюється напруга на ушкодженій фазі.

Крім того, у всіх теоріях ухвалюється, що напруга на нейтралі, що сформувалося при попередньому запалюванні дуги, не змінюється до моменту наступного запалювання.

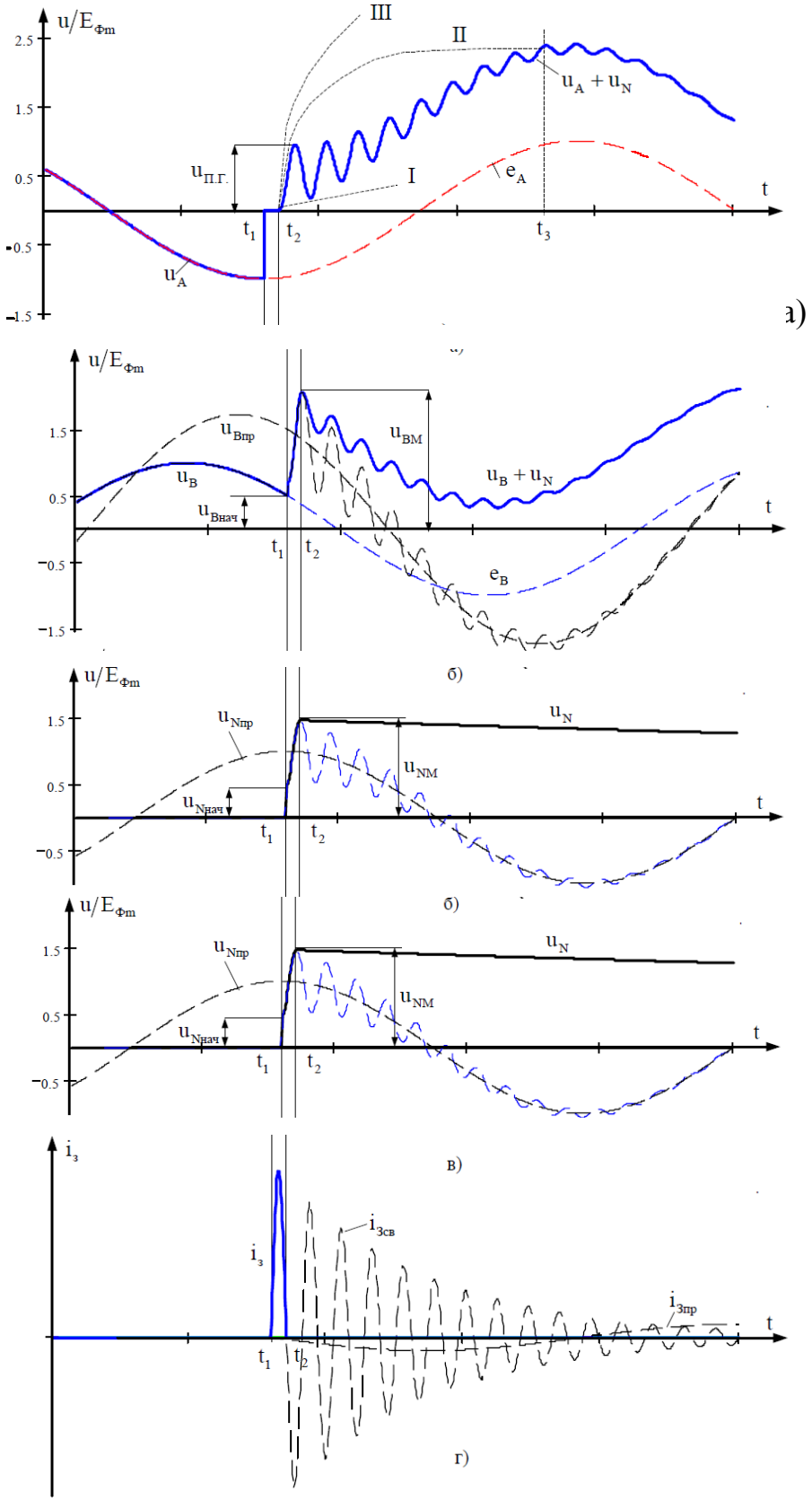


Рис. 3.14 - Перехідні процеси при дуговім замиканні в мережі з ізольованої нейтраллю

ТЕМА 4. МЕРЕЖІ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ЄМНІСНОГО СТРУМУ

Дуга ємнісного струму в мережі з незаземленої нейтраллю при порівняно невеликих струмах може мати перемежований характер і бути причиною значних перенапруг. При більших струмах дуга може стати стійкою й довготривалого горіння її зрештою приводить до міжфазного короткого замикання.

Тому необхідно вживати заходів для можливо швидкої ліквідації дуги замикання. Одним з відомих і широко використовуваних варіантів розв'язку такого завдання є заземлення нейтралі через котушку, індуктивність якої підбирається певним чином. Заземлююча котушка одержала назву дугогасильної котушки або дугогасильного реактора. Даний термін, як буде видне з подальшого, дуже точно відображає призначення й механізм дії цього апарата.

Дугогасильний реактор створює при замиканні на землю подвійну дію: по-перше, він суттєво зменшує (компенсує) струм у місці замикання, а по-друге, сповільнює відновлення напруги на ушкодженій фазі після обриву дуги. Обидві ці обставини сприяють гасінню дуги.

Здатність дугогасильного реактора компенсувати ємнісний струм замикання на землю визначає одне із прийнятих назв мереж, заземлених через дугогасильний реактор – компенсовані мережі.

4.1. Компенсована мережа при стійкім замиканні на землю

Найпоширенішим варіантом підключення дугогасильних реакторів є використання спеціальних заземлюючих трансформаторів зі схемою з'єднання зірка-трикутник (рис. 4.1, а). Для цієї мети можуть також використовуватися силові трансформатори, наявні в мережі, якщо їх обмотки мають схему з'єднання зірка-трикутник.

При наявності в трансформатора обмотки, з'єднаної в трикутник, його

опір нульової послідовності невелике й практично дорівнює опору прямої послідовності. У цьому випадку це має істотне значення, тому що опір нульової послідовності трансформатора при замиканні на землю виявляється включеним послідовно з дугогасильним реактором. Потужність трансформатора, до якого підключається дугогасильний реактор, повинна бути обрана з урахуванням його навантаження й додаткового струму дугогасильного реактора. Якщо трансформатор використовується тільки для підключення дугогасильного реактора, то його потужність повинна бути дорівнює потужності реактора. У цьому випадку еквівалентний реактивний опір трансформатора струмам нульовий послідовності становить кілька відсотків від опору дугогасильного реактора. Наявність послідовного опору практично ніяк не впливає на процеси при замиканні на землю, якщо опір дугогасильного реактора вибирається з урахуванням цього опору. Якщо зневажити малим опором заземлюючого трансформатора, то при аналізі можна дугогасильний реактор перенести в нейтральну крапку еквівалентного джерела живлення, тому що при прийнятих допущеннях потенціали нейтральної крапки джерела й заземляючого трансформатора однакові. Таке перетворення схеми не приводить до яких-небудь принципових викривлень розглянутих процесів.

Прийнята з обліком сказаного трифазна схема заміщення компенсованої мережі для наступного аналізу представлена на рис. 4.1, б. Так само як і в мережі з ізольованої нейтраллю в цьому режимі можна зневажити поздовжніми опорами елементів мережі й заміняти розподілені ємності й активні провідності фаз відносно землі зосередженими.

У компенсованій мережі, як це буде видне з подальшого, у деяких випадках, зокрема при замиканні на землю, необхідно враховувати, що практично електрорушійні сили джерела не строго синусоїдальні, тому задамо їх у вигляді

$$
\begin{aligned}
e_A &= \sum_1^{\nu} E_{\Phi m\nu} \sin \nu\omega t, \\
e_B &= \sum_1^{\nu} E_{\Phi m\nu} \sin\left(\nu\omega t + \frac{4}{3}\nu\pi\right), \\
e_C &= \sum_1^{\nu} E_{\Phi m\nu} \sin\left(\nu\omega t + \frac{2}{3}\nu\pi\right).
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

де ν = 1,3,5, 7.... .

Фізичні причини, що викликають несинусоїдальність Е.Р.С. джерел, такі, що вони містять тільки непарні гармоніки, що й відбите в (4.1).

лінії

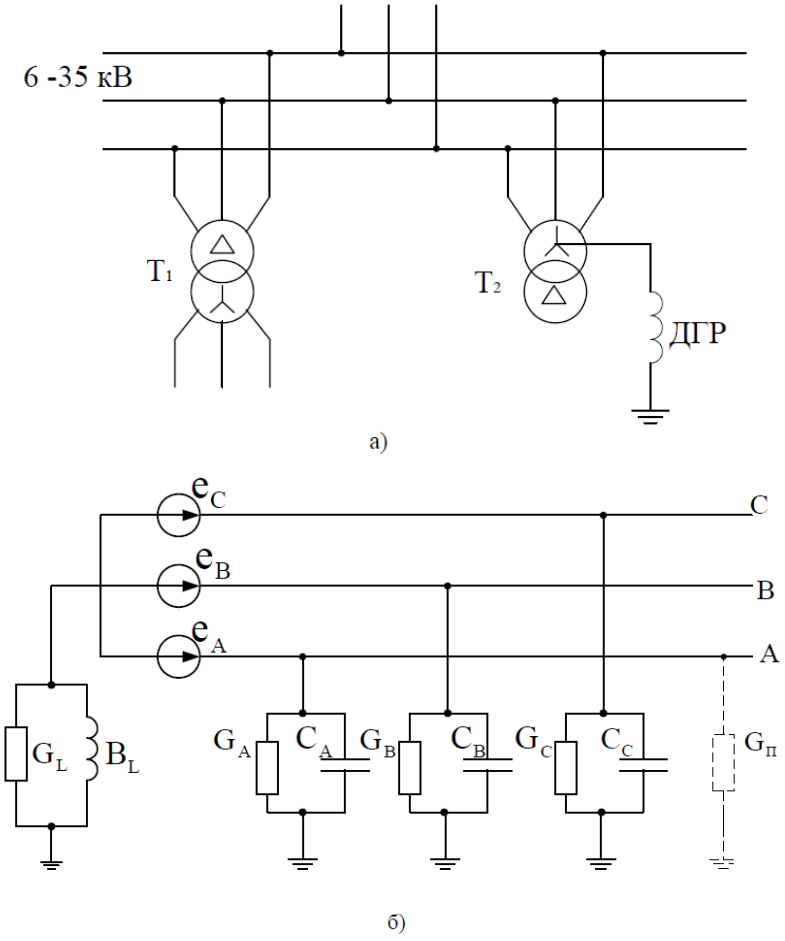


Рис. 4.1. Схеми мережі: а) – схема мережі з компенсованим заземленням нейтралі ДГР – дугогасильний реактор;

б) – трифазна схема заміщення з компенсованим заземленням нейтралі

Будемо вважати, що Е.Р.С. джерела симетричні. При завданні Е.Р.С. у

вигляді (4.1) це означає, що гармоніки утворюють:

- при ν = 1, 7, 13… – трифазні системи прямої послідовності;
- ν = 5, 11, 17… – трифазні системи зворотної послідовності;
- ν = 3, 9, 15… – трифазні системи нульовий послідовності.

Для будь-якого значення ν електричні величини, що характеризують режим компенсованої мережі при стійкім замиканні на землю через перехідну провідність $G_П$, наприклад, на фазі А, визначаються наступними співвідношеннями: напруга на нейтралі

$$\dot{U}_{Nν} = -\frac{\dot{E}_{Aν}\underline{Y}_{Aν} + \dot{E}_{Bν}\underline{Y}_{Bν} + \dot{E}_{Cν}\underline{Y}_{Cν} + \dot{E}_{Aν}G_П}{\underline{Y}_{Aν} + \underline{Y}_{Bν} + \underline{Y}_{Cν} + G_П + G_L + B_L}; \tag{4.2}$$

напруга на ушкодженій фазі

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Aν} &= \dot{E}_{Aν} + \dot{U}_{Nν} = \\ &= \frac{\dot{E}_{Aν}\left(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C\right) + \dot{E}_{Aν}\left(G_L + B_L\right)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L} - \\ &- \frac{\dot{E}_{Aν}\underline{Y}_A + \dot{E}_{Bν}\underline{Y}_B + \dot{E}_{Cν}\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L};\end{aligned} \tag{4.3}$$

струм у місці замикання

$$\begin{aligned}\dot{I}_{3ν} &= \dot{U}_{Aν} \cdot G_П = \\ &= \frac{\dot{E}_{Aν}\left(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + B_L + G_L\right)G_П}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L} - \\ &- \frac{G_П\left(\dot{E}_{Aν}\underline{Y}_A + \dot{E}_{Bν}\underline{Y}_B + \dot{E}_{Cν}\underline{Y}_C\right)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L};\end{aligned} \tag{4.4}$$

напруги на неушкоджених фазах В и С

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Bν} &= \dot{E}_{Bν} + \dot{U}_{Nν} = \\ &= \frac{\dot{E}_{Bν}\left(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L\right)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L} - \\ &- \frac{\dot{E}_A G_П + \left(\dot{E}_{Aν}\underline{Y}_A + \dot{E}_{Bν}\underline{Y}_B + \dot{E}_{Cν}\underline{Y}_C\right)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L};\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\dot{U}_{C\nu} = \dot{E}_{C\nu} + \dot{U}_{N\nu} = \\ = \frac{\dot{E}_{C\nu}\left(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L\right)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L} - \\ - \frac{\dot{E}_{A\nu}G_П + \left(\dot{E}_{A\nu}\underline{Y}_A + \dot{E}_{B\nu}\underline{Y}_B + \dot{E}_{C\nu}\underline{Y}_C\right)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_П + G_L + B_L}. \tag{4.6}$$

У формулах (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) і (4.6)

$\dot{E}_{A\nu} = \dot{E}_{B\nu} = \dot{E}_{C\nu} = \dot{E}_Ф$ – діючи фазні струми Е.Р.С. частоти $\nu\omega$;

$\underline{Y}_{A\nu} = G_A + j\nu\omega C_A$; $\underline{Y}_{B\nu} = G_B + j\nu\omega C_B$; $\underline{Y}_{C\nu} = G_C + j\nu\omega C_C$ – повні провідності фаз відносно землі на частоті $\nu\omega$;

$G_П = 1/R_П$ – провідність в місці замикання.

$B_L = 1/j\nu\omega L$ – реактивна провідність дугогасильного реактора.

G_L – активна провідність, що враховує в дугогасильному реакторі.

Реальна несиметрія провідностей фаз виявляє малий вплив на струм у місці замикання, тому його визначимо, поклавши

$$G_A = G_B = G_C = G_Σ = G_Ф \text{ та } C_A = C_B = C_C = C_Σ = C_Ф.$$

Тому

$$G_A+G_B+G_C=3G_Ф \text{ і } C_A+C_B+C_C=3C_Ф. \tag{4.7}$$

Для гармонійних складових утворюють системи Е.Р.С. прямої та зворотної послідовностей із частотою цих складових $\dot{E}_{A\nu} + \dot{E}_{B\nu} + \dot{E}_{C\nu} = 0$ тому струм замикання рівняється

$$\dot{I}_{З\nu} = \frac{\dot{E}_{A\nu}\left(3G_Ф + G_L + j3\nu\omega C_Ф - j\frac{1}{\nu\omega L}\right)}{\left(3G_Ф + G_L + j3\nu\omega C_Ф - j\frac{1}{\nu\omega L}\right) + \frac{1}{R_П}} \cdot \frac{1}{R_П}. \tag{4.8}$$

Перетворимо (4.8) до виду

$$\dot{I}_{З\nu} = \frac{\dot{E}_{A\nu}}{R_П + \frac{1}{\left[\left(G_L + 3G_Ф\right) + j\left(3\nu\omega C_Ф - \frac{1}{\nu\omega L}\right)\right]}}. \tag{4.9}$$

Для гармонійних складових утворюють систему нульової послідовності $\dot{E}_{A\nu} = \dot{E}_{B\nu} = \dot{E}_{C\nu}$, а струм замикання рівний

$$\dot{I}_{3\nu} = \frac{\dot{E}_{A\nu}(B_L + G_L)}{3G + G_L + j3\nu\omega C - j\dfrac{1}{\nu\omega L} + \dfrac{1}{R_П}} \cdot \frac{1}{R_П}. \qquad (4.10)$$

Прийнявши в (4.10) $R_П = 0$, одержимо

$$\dot{I}_{3\nu} = \dot{E}_{A\nu}\left(\frac{1}{j\nu\omega L} + G_L\right). \qquad (4.11)$$

З (4.11) видне, що струми гармонік із частотами кратними трьом визначаються опором дугогасильного реактора, яке на частотах цих гармонік велике. Тому в місці замикання струми гармонік кратних трьом малі і їх надалі не враховуємо.

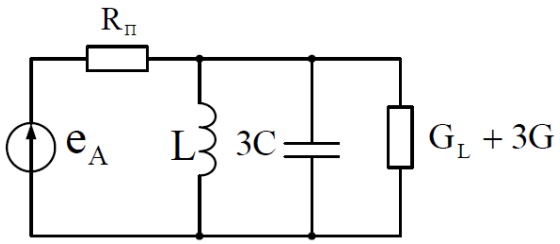


Рис. 4.2 - Схема заміщення нульової послідовності компенсованої мережі при замиканні на землю через перехідний опір $R_П$ для гармонійних складових, утворюючих системи прямій і зворотної послідовностей

Повернемося до вираження (4.9) для струму гармонік не кратних трьом. Цьому вираженню відповідає схема заміщення нульовий послідовності, наведена на рис. 4.2. З (4.9), а так само зі схеми заміщення видно, що при виборі індуктивності дугогасильного реактора такий, коли $\nu = 1 \quad 1/\omega L = 3\omega C$, реактивна складова струму основної (промислової) частоти дорівнює нулю при будь-якім значенні перехідного опору в місці замикання. Звідси ясний механізм компенсуючої дії дугогасильного реактора, а також очевидно, що при зазначенім вище умові компенсується тільки струм основної частоти, а струми вищих гармонік практично не компенсується, тому що при $\nu = 1 \quad 1/\omega L = 3\omega C$, реактивна складова струму основної (промислової) частоти рівна нулю при любому значенні перехідного опору в

місці замикання. Тому, зрозумілий механізм компенсуючої дії дугогасильного реактора, а також очевидно, що при указаних вище умовах компенсується струм тільки струм основної частоти, а струми вищих гармонік практично не компенсуються, так як при всіх $\nu > 1$ $1/\nu\omega L << 3\nu\omega C$.

Практично важливо визначити значення струму замикання при металевому замиканні на землю, тобто при RП = 0 . Для цього випадку запишемо вираження діючого значення струму в наступному виді

$$I_З = \sqrt{E_{Ф\nu}^2\left(3\omega C_Ф - \frac{1}{\omega L}\right)^2 + \sum_1^v E_{Ф\nu}^2\left(G_L + 3G_Ф\right)^2 + \sum_3^v E_{Ф\nu}^2\left(3\nu\omega C_Ф - \frac{1}{\nu\omega L}\right)^2} \qquad (4.12)$$

У цьому вираженні перший доданок – реактивна складова струму основної частоти, друге – діюче значення активної складової струму, третє – діюче значення реактивної складової, обумовленої вищими гармоніками.

У реальних мережах амплітуди вищих гармонік Е.Р.С. значно менше амплітуди основної гармоніки, тому до активній складової можна враховувати тільки основну гармоніку. Реактивної складової вищих гармонік зневажати не слід, тому що вона значна й при малих амплітудах гармонік Е.Р.С. через зростання ємнісної провідності мережі на частотах вищих гармонік. Провідність дугогасильного реактора на вищих гармоніках, навпаки, зменшується й тому струми вищих гармонік, що відгалужуються в нього, малі і їх можна не враховувати.

У зв'язку зі сказаним практично в струмі замикання на землю враховуються наступні складові.

1. Реактивна складова основної частоти

$$I_{1р} = E_{Ф1}\left(3\omega C_Ф - \frac{1}{\omega L}\right). \qquad (4.13)$$

2. Активна складова основної частоти

$$I_{1а} = E_{Ф1}\left(3G_Ф + G_L\right). \qquad (4.14)$$

3. Ємнісна складова вищих гармонік

$$I_{Cv} = \sqrt{\sum_{3}^{v} E_{\Phi v} v 3\omega C_{\Phi}} \ . \qquad (4.15)$$

Розглянемо ці складові токи замикання більш докладно.

Складова I_{1p} обумовлена тим, що практично завжди має місце відхилення від умови точної компенсації, тобто $1/\omega L \neq 3\omega C_{\Phi}$. Ступінь відхилення від умови точної компенсації характеризується розладом компенсації υ, яка визначається в такий спосіб:

$$\upsilon = 1 - \frac{I_{L1}}{I_{C1}}, \qquad (4.16)$$

де $I_{L1} = E_{\Phi 1}\frac{1}{\omega L}$ – індуктивна складова струму дугогасильного реактора

$I_{C1} = E_{\Phi 1} \cdot 3\omega C_{\Phi}$ – ємнісний струм замикання на землю.

При точній компенсації індуктивна складова струму дугогасильного реактора дорівнює ємнісному струму мережі й $\upsilon = 0$. При $I_L < I_C$ має місце недокомпенсація $(\upsilon > 0)$, при $I_L > I_C$ має місце перекомпенсація $(\upsilon < 0)$.

Вочевидь υ може бути представлена також в наступному виді

$$\upsilon = 1 - \frac{1}{\omega L \cdot 3\omega C_{\Phi}} = 1 - \frac{\omega_o^2}{\omega^2}, \qquad (4.17)$$

де $\omega_o = \sqrt{\frac{1}{3LC_{\Phi}}}$ – резонансна частота коливального контуру, створеного ємністю мережі й індуктивністю дугогасильного реактора.

Активна складова струму I_{1a} у свою чергу складається із двох доданків. Одна з них $-E_{\Phi 1} \cdot 3G$ обумовлена витоками ізоляції мережі і при гарному стані ізоляції становить 2 ÷ 3% від ємнісного струму мережі. Друга обумовлена втратами в дугогасильному реакторі й складає близько 2% струму I_L.. Активну складову струму прийнято характеризувати безрозмірною величиною

$$d = \frac{I_{1a}}{I_C} = \frac{3G_{\Phi} + G_L}{3\omega C_{\Phi}}, \qquad (4.18)$$

яка називається коефіцієнтом демпфірування або коефіцієнтом заспокоєння. Присвоєння величині d саме такого терміна буде ясно з подальшого викладу. Відповідно до наведених вище можливих значень провідності ізоляції мережі й втрат у дугогасильному реакторі, що гасить, коефіцієнт демпфірування звичайно ухвалюють d = 0,05.

Ємнісна складова вищих гармонік (4.15) визначається ступенем викривлення фазних напруг. У цей час на промислових підприємствах усе більше використовуються установки й технологічні процеси, що вимагають живлення постійним струмом. Для одержання постійного струму застосовуються керовані й некеровані напівпровідникові перетворювачі. Навантаження, що живляться через напівпровідникові перетворювачі, споживають несинусоїдальний струм, що містить непарні гармоніки. Через спадання напруги на поздовжніх опорах від протікання несинусоїдального струму, відбувається викривлення фазних напруг. Причому зміст вищих гармонік тим більше, чим електрично ближче розглянута крапка мережі до навантаження, що споживає несинусоїдальний струм.

Порівняно невеликі по амплітуді гармоніки у фазні напругах створюють значний ємнісний струм замикання. Так, наприклад, якщо амплітуда 11-й гармоніки Е.Р.С. становить 5% від амплітуди основної гармоніки $\left(E_{Ф11} = 0,05E_{Ф1}\right)$, , то діюче значення 11-й гармоніки ємнісного струму замикання дорівнює

$$I_{11} = 0,05E_{Ф1} \cdot 3 \cdot 11\omega C_{Ф} = 0,55E_{Ф1}3\omega C_{Ф},$$

тобто становить більш половини ємнісного струму основної частоти. Складові вищих гармонік, як це випливає з викладеного, не компенсуються дугогасильним реактором, і при великій величині суттєво погіршують умови гасіння дуги.

Далі позначення номера першої гармоніки («1») в індексі електричних величин опускаємо.

Визначимо напруги на неушкоджених фазах і напруги на нейтралі при

стійкім замиканні на землю. Як і раніше вважаємо провідності фаз щодо землі однаковими. Як випливає із викладеного вище, вищі гармоніки Е.Р.С. джерела виявляють суттєвий вплив тільки на струм замикання, а на рівні напруги практично не впливають, тому враховуємо в напругах тільки основні гармоніки.

Вираження для напруги на нейтралі по (4.2) при таких умовах і замиканню фази А має вигляд

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \frac{\frac{1}{R_П}}{j\left(3\omega C_Ф - \frac{1}{\omega L}\right) + 3G_Ф + G_L + \frac{1}{R_П}}.$$

Поділивши чисельник і знаменник на утворів одержимо

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \frac{(dR_{П*} + 1) - j\upsilon R_{П*}}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}, \qquad (4.19)$$

де $R_{П*} = R_П \cdot 3\omega C_Ф$ – перехідний опір у місці замикання в частках від ємнісного опору, обумовлений сумарної ємністю фаз мережі щодо землі.

Абсолютне значення напруги на нейтралі

$$U_N = \frac{E_Ф}{\sqrt{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}}. \qquad (4.20)$$

Напруга на неушкоджених фазах за тих самих умов

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{E}_B - \dot{E}_A \frac{(dR_{П*} + 1) - j\upsilon R_{П*}}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}; \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C - \dot{E}_A \frac{(dR_{П*} + 1) - j\upsilon R_{П*}}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}. \end{aligned}, \qquad (4.21)$$

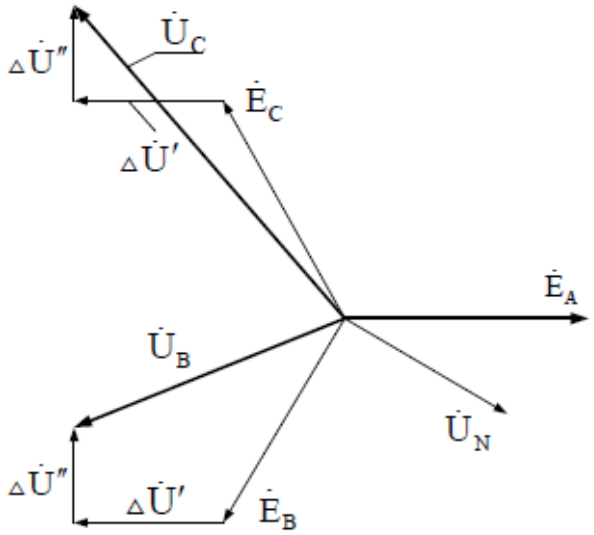
Вираженням (4.21) відповідає векторна діаграма на рис. 4.3, побудована при $\upsilon>0$, тобто при недокомпенсації. За допомогою цієї векторної діаграми визначаємо абсолютні значення напруг на неушкоджених фазах

$$U_{C,B} = E_Ф \sqrt{\left[0{,}5 + \frac{R_{П*} + 1}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}\right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \pm \frac{\upsilon R_{П*}}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}\right]^2} \qquad (4.22)$$

Знак «плюс» у формулі (4.22) ставиться до випереджальної по

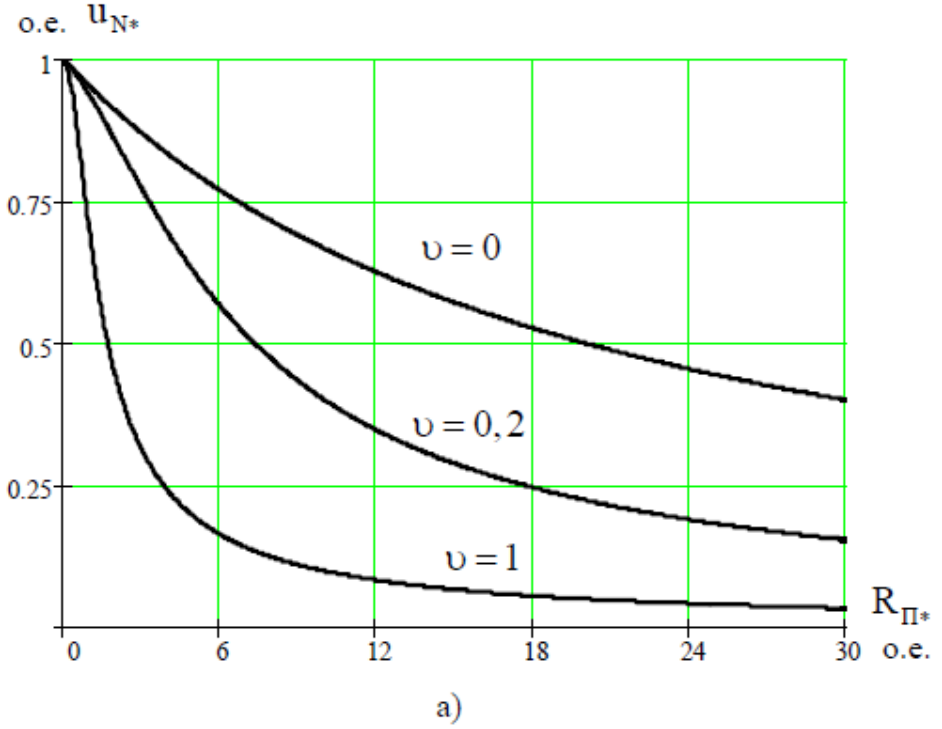
відношенню до ушкодженої фази, а знак «мінус» – до відстаючої. При тобто при перекомпенсації, знаки міняються місцями.

На рис. 4.4 наведені криві залежності напруг на нейтралі й на неушкодженій фазі (на якій воно найбільше) від перехідного опору в місці замикання при розладах компенсації $\upsilon = 0,2$, $\upsilon = 0$ і для порівняння також при $\upsilon = 1$, що відповідає мережі з ізольованою нейтраллю. Також як і раніше напруга на графіку віднесене до робочої фазної Е.Р.С..

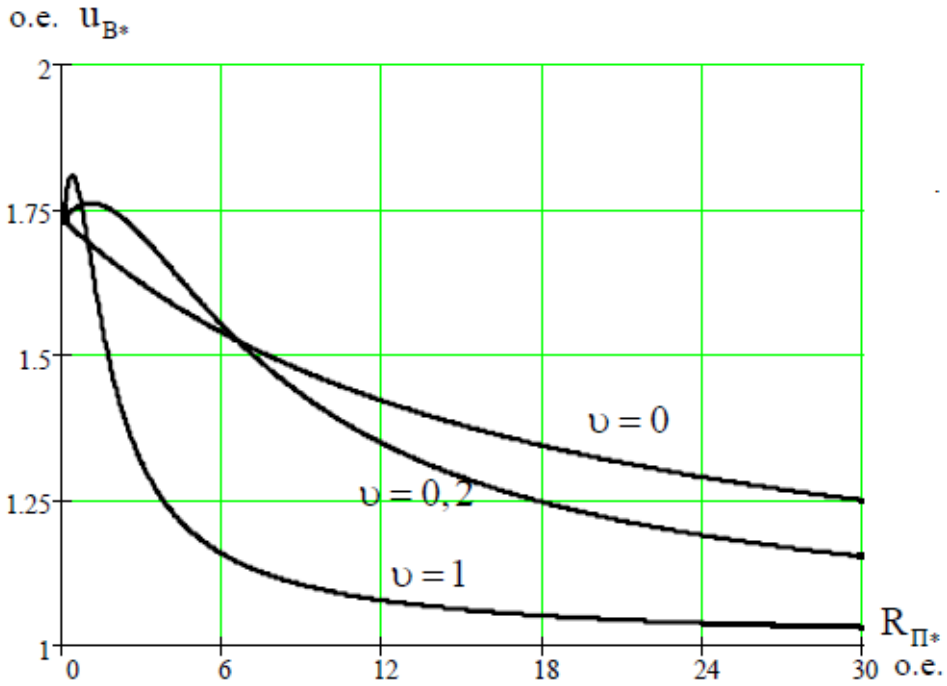


$$\Delta\dot{U}' = \frac{dR_{П*} + 1}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}, \quad \Delta\dot{U}'' = \frac{\upsilon R_{П*}}{(dR_{П*} + 1)^2 + (\upsilon R_{П*})^2}.$$

Рис. 4.3 - Векторна діаграма напруг при однофазному замиканні через перехідний опір у компенсованій мережі



а)



б)

Рис. 4.4 - Залежність напруги на нейтралі (а) і на неушкодженій фазі (б) при однофазнім замиканні в компенсованій мережі від перехідного опору й розладах компенсації при d = 0,05

Із кривих рис. 4.4, б випливає, що найбільші напруги при металевому

замиканні фази на землю практично дорівнюють лінійній напрузі незалежно від значення υ. Тобто щодо цього компенсована мережа практично не відрізняється від мережі з ізольованої нейтраллю. У той же час можна сказати, що компенсована мережа більш чутлива до замикання на землю в тому розумінні, що значна напруга на нейтралі й відповідно зростання напруги на неушкоджених фазах мають місце при більших перехідних опорах, чому в мережі з ізольованої нейтраллю. Ця «чуттєвість» тим вище, чим ближче настроювання дугогасильного реактора до резонансної й чим менше d. Так, наприклад, при $R_{п*}= 10$ та $d = 0{,}05$ в мережі з ізольованої нейтраллю напруга на випереджальній фазі $u_C = 1{,}09E_{Фm}$, а в мережі з компенсацією ємнісного струму й $\upsilon = 0$ $u_C = 1{,}45E_{Фm}$.

4.2. Компенсована мережа в нормальному режимі

При розгляді цього режиму істотне значення має можливі відмінності провідностей фаз щодо землі.

Напруга на нейтралі в цьому режимі одержимо по (4.2), прийнявши при $\nu = 1$ $C_A \neq C_B \neq C_C$, $G_A \neq G_B \neq G_C$ и $R_П \to \infty$, $(G_П = 0)$, отримаємо

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \frac{G_A + a^2 G_B + a G_C + j\omega\left(C_A + a^2 C_B + a C_C\right)}{G_y + G_L + j\left(\omega C_y - \frac{1}{\omega L}\right)}.$$

Діючи також, як і при виводі вираження для напруги зміщення нейтралі, з урахуванням співвідношень (4.17), (4.18), у яких $3C_Ф = C_Σ$ одержимо

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \left[\frac{\alpha_G + j\alpha_C}{d + j\upsilon}\right]. \qquad (4.23)$$

У нормальному режимі можна враховувати тільки несиметрію ємностей фаз. Тоді абсолютне значення напруги зсуву на нейтралі по (4.23) рівно

$$U_{Nсм} = E_{Ф} \frac{\alpha_C}{\sqrt{d^2 + \upsilon^2}}. \qquad (4.24)$$

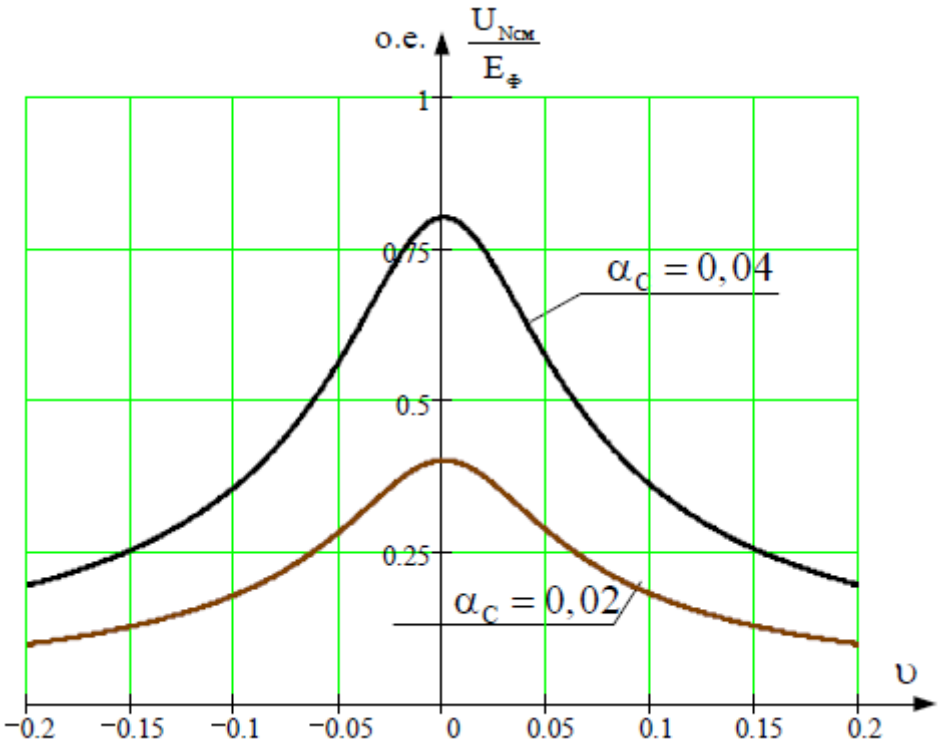


Рис. 4.5 - Залежність напруги зсуву нейтралі в компенсованій мережі в нормальному режимі від розладу компенсації при d = 0.05

На рис. 4.5 побудовані графіки залежності напруги зсуву нейтралі від розладу компенсації при різних значеннях α_C. Як видне, навіть при невеликих значеннях коефіцієнта несиметрії, напруга зсуву нейтралі, при настроюванні дугогасильного реактора близької до резонансної, може бути більшим, а це у свою чергу приводить до підвищення напруг на фазах щодо землі.

Напруга несиметрії в кабельних мережах практично дорівнює нулю, через зазначену вище, а в повітряних мережах може бути значним. У повітряних ліній 35 кВ залежно від розташування проводів фаз на опорі коефіцієнт ємнісної несиметрії лежить у межах приблизно від 0,015 до 0,04. Тому напруга зміщення нейтралі при настроюваннях дугогасильного реактора близьких до резонансу іноді досягають неприпустимих значень. За

правилами улаштування електроустановок у тривалому робочому режимі мережі напруга зсуву нейтралі допускається не більш 15% від номінальної фазної напруги й не більш 30% протягом однієї години. Для зниження коефіцієнта несиметрії, а отже, і напруги зміщення нейтралі, проводиться транспонування проводів фаз, що приводить у середньому по всій мережі до вирівнювання розташування проводів щодо землі. За існуючими правилами за допомогою транспозиції проводів фаз коефіцієнт ємнісної несиметрії мережі повинен бути знижений до значення не більш 0,0075. Однак це не виключає виникнення несиметрії при неповнофазному включенні або відключенні вимикачів окремих приєднань, обривах фаз т.п.

За інших рівних умов напруга зсуву нейтралі в неповнофазному режимі буде менше, якщо в нормальному режимі дугогасильний реактор, був настроєний з перекомпенсацією, тому що при відключенні на якій-небудь ділянці однієї або двох фаз сумарна ємність мережі зменшується, що приводить до ще більшої перекомпенсації, тобто до видалення від резонансного настроювання. Очевидно, що при недокомпенсації картина буде зворотною.

Із цього погляду режим невеликої перекомпенсації є кращим у порівнянні з недокомпенсуванням.

4.3. Перехідні процеси при замиканні на землю в мережі з компенсацією ємнісного струму

Розглянемо вплив дугогасильного реактора на перехідні процеси при запалюванні й гасінні заземлюючої дуги. Схема заміщення для аналізу перехідних процесів наведена на рис. 4.6. На цій схемі не показані активні опори проводів фаз, тому що на характер розглянутих електричних величин і, зокрема, на загасання вільних складових токи й напруги впливають не тільки ці опори, але й результуючий опір $R_{екв}$, в состав якого входить опір на шляху

повернення струму замикання через землю, а в кабельних мережах і опір провідному оболонки кабелів. Причому опір $R_{екв}$ різний для різних стадій перехідного процесу. Наприклад, для перехідних складових високої частоти воно може збільшуватися через поверхневий ефект. Тому для перехідних складових, як і раніше, ухвалюються коефіцієнти загасання.

При запалюванні дуги так само як і в мережі з ізольованої нейтраллю відбувається дозарядка ємностей неушкоджених фаз до лінійної напруги. Дугогасильний реактор на цей процес практично ніякого впливу не виявляє, тому що він виявляється зашунтованим індуктивністю ушкодженої фази, яка в багато разів менше індуктивності дугогасильного реактора. Тому дозарядка ємностей непошкоджених фаз супроводжується загасаючими коливаннями, на частоту й швидкість загасання яких дугогасильний реактор практично не впливає.

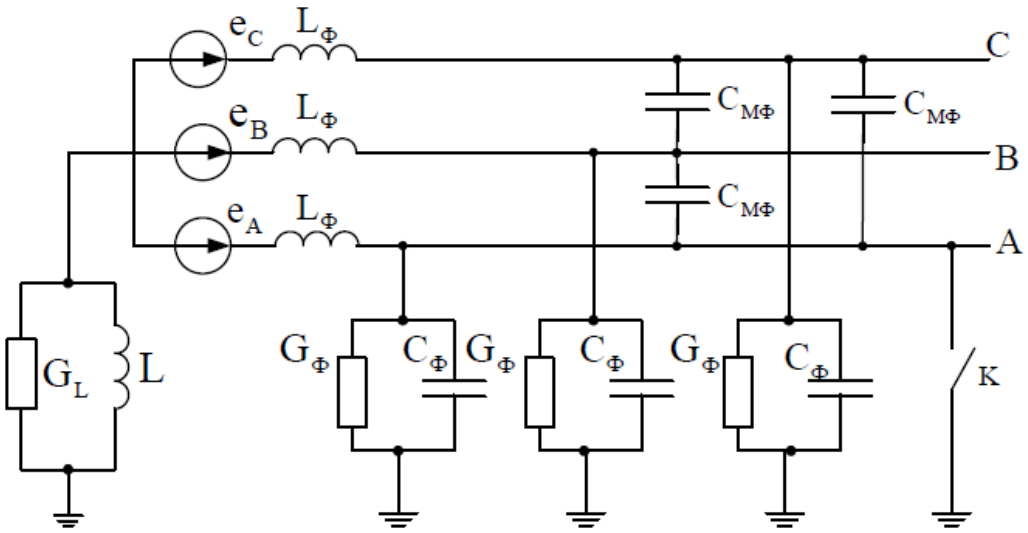


Рис. 4.6 - Трифазна схема заміщення для аналізу перехідних процесів у мережі з компенсацією ємнісних струмів

Як видно зі схеми (рис. 4.6), у момент замикання дугогасильний реактор підключається до Е.Р.С. джерела ушкодженої фази, що визиває певний перехідний процес зміни струму дугогасильного реактора.

Якщо врахувати, що індуктивності фаз $L_Ф << L$, можна прийняти

$L_Ф \approx 0$. Тоді схема електричного ланцюга для цього перехідного процесу прийме вид, показаний на рис. 4.7.

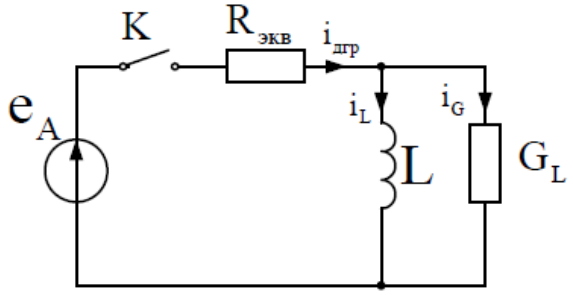


Рис. 4.7 - Схема заміщення для аналізу перехідних процесів у ланцюзі дугогасильного реактора при замиканні на землю

Перехідний процес у ланцюзі дугогасильного реактора (рис. 4.7) описується диференціальним рівнянням

$$L\left(\frac{1}{R_{экв}}+G_L\right)\frac{di_L}{dt}+i_L=\frac{e_A}{R_3}. \qquad (4.25)$$

Якщо прийняти, що в момент замикання початкова фаза Е.Р.С. має деяке значення φ_3, а початкове значення струму $i_L=0$, то розв'язок рівняння (4.25) буде мати вигляд

$$i_L=I_m\sin(\omega t+\varphi_3-\varphi)-\left[I_m\sin(\varphi_3-\varphi)\right]e^{-t/\tau_L}, \qquad (4.26)$$

де

$$I_m=\frac{E_{Фm}}{\sqrt{R_{экв}^2+\omega^2L^2}}, \qquad \varphi=\operatorname{arctg}\frac{\omega L}{R_3}, \quad \tau_L=L\left(\frac{1}{R_{экв}}+G_L\right).$$

Реальні параметри дугогасильного реактора такі, що $\omega L >> R_3$ і тому $\varphi \approx 90^\circ$. Замикання на землю відбувається, як правило, у більшості випадків у результаті пробою ізоляції, коли напруга на ушкодженій фазі близька до максимального значення, тобто $\varphi_3 \approx 90^\circ$. За таких умов, як видно з (4.26), періодична складова струму близька до нуля, тому цю складову перехідного струму замикання далі не враховуємо.

Таким чином, у цілому можна вважати, що перехідний процес

установлення електричних величин після замикання на землю (запалювання дуги) у компенсованій мережі практично не відрізняється від перехідного процесу в мережі з ізольованої нейтраллю.

Після гасіння дуги, навпаки, дугогасильний реактор впливає на перехідний процес, тому що він суттєво змінює провідність мережі щодо землі, і тому змінює характер перехідного процесу стікання надлишкових зарядів і, таким чином, характер зміни напруги на нейтралі.

Процес зміни напруги на нейтралі після гасіння дуги може бути розглянутий за схемою заміщення, представленої на рис. 4.8.

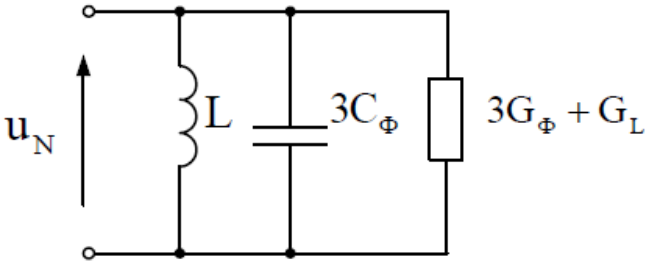


Рис. 4.8 - Схема заміщення мережі з компенсацією ємнісних струмів після гасіння дуги в місці замикання

Як видне, ця схема являє собою коливальний контур, перехідний процес у якім описується диференціальним рівнянням

$$\frac{d^2u_N}{dt^2}+\frac{(3G_Ф+G_L)}{3C_Ф}\frac{du_N}{dt}+\frac{1}{L3C_Ф}u_N=0, \qquad (4.27)$$

де u_N – миттєве значення напруги вільних коливань.

Враховуючі (4.17) і (4.18) рівняння (4.27) можна представити у вигляді

$$\frac{d^2u_N}{dt^2}+\omega d\frac{du_N}{dt}+\omega^2(1-\upsilon)u_N=0. \qquad (4.28)$$

Коріння характеристичного рівняння, що відповідає (4.28) є комплексними сполученими, тому що практично завжди $\left(\frac{d}{2}\right)^2 << (1-\upsilon)$, та розраховуються, як

$$p_{1,2} = \left[\frac{d}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - (1-\upsilon)} \right] \omega .$$

Тому розв'язок рівняння (4.28) має вигляд

$$u_N = U_{Nm} e^{-\frac{d}{2}\omega t} \sin\left(\omega_3 t + \varphi_{N0}\right), \qquad (4.29)$$

де $\omega_3 = \omega\sqrt{(1-\upsilon) - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$ – частота вільних коливань перехідного процесу зміни напруги на нейтралі;

U_{Nm}, φ_{N0} – початкова амплітуда й початкова фаза вільних коливань напруги на нейтралі.

Додатково слід також зазначити, що з досить високої точністю можна вважатися, що $\omega_3 \approx \omega\sqrt{(1-\upsilon)}$, , тому що, як зазначене вище, $\left(\frac{d}{2}\right)^2 << (1-\upsilon)$.

Після обриву дуги вільні коливання по (4.29) накладаються на робочі напруги всіх трьох фаз. На ушкодженій фазі миттєве значення результуючого напруги дорівнює

$$u_A = e_A + u_N . \qquad (4.30)$$

Значення U_{Nm}, φ_{N0} визначаються початковими миттєвими значеннями напруги (u_{N0}) і струму (i_{L0}) у контурі (рис. 4.8) у момент гасіння дуги. Беручи до уваги, що на частоті вільних коливань ω_3 $\frac{1}{\omega_3 L} >> 3G_\Phi + G_L$, , можна вважати для струмів у контурі

$$i_C = 3C_\Phi \frac{du_N}{dt} \approx i_L . \qquad (4.31)$$

Таким чином, якщо момент гасіння дуги ухвалюється за початок перехідного процесу зміни напруги на нейтралі, те з начальних умов при $t = 0$: $u_N = u_{N0}$, $i_L = i_{L0}$. із (4.29), (4.31) одержимо наступні рівняння для визначення U_{Nm}, φ_{N0}

$$u_{N0} = U_{Nm}\sin(\varphi_{N0});$$
$$i_{L0} = 3C_{\Phi}\omega_3 U_{Nm}\cos(\varphi_{N0}). \qquad (4.32)$$

Вирішуючи рівняння системи (4.32) одержимо

$$U_{Nm} = \sqrt{u_{N0}^2 + \left(\frac{i_{L0}}{\omega_3 3C_{\Phi}}\right)^2};$$
$$tg\varphi_{N0} = \frac{u_{N0}\omega_3 3C_{\Phi}}{i_{L0}}. \qquad (4.33)$$

Таким чином, початкові умови для розв'язку (4.29) різні залежно від того в який момент гасне дуга після попереднього її запалювання. Процес формування початкових умов і послідуючої зміни напруги на нейтралі й на ушкодженій фазі, у випадку, якщо дуга гасне при першім проходженні через нуль вільної складової струму, розглянемо за тих самих умов, при яких построєні криві перехідного процесу для мережі з ізольованої нейтраллю (рис. 3.14). У розглянутому прикладі струм дугогасильного реактора до замикання дорівнює нулю й за час горіння дуги, рівному $\frac{T_1}{2}$ практично не змінюється, тому що постійна часу ланцюга дугогасильного реактора набагато більше, ніж час горіння дуги. Тому, вважаємо, що в (4.33) $i_{L0} = 0$, отримаємо $U_{Nm} = u_{N0}, \varphi_{N0} = 90^0$. Таким чином, напруга на нейтралі після гасіння дуги змінюється по закону

$$u_N = U_{Nm}e^{-\frac{d}{2}\omega t}\cos(\omega_3 t). \qquad (4.34)$$

У момент гасіння дуги сума напруг $e_A + u_N \neq 0$, тому, також як і в мережі з ізольованої нейтраллю, має місце перехідний процес відновлення напруги на ушкодженій фазі з частотою ω_2 і формування певного піка. гасіння.

Якщо пробивна напруга дугового проміжку більше $u_{п.г}$, то далі напруга на ушкодженій фазі з обліком (4.34) змінюється за законом

$$u_N = -E_{\Phi m}\cos\left(\omega\left(t+\frac{T_1}{2}\right)\right)+U_{Nm}e^{-\frac{d}{2}\omega t}\cos(\omega_3 t). \qquad (4.35)$$

При одержанні (4.35) прийняте, що замикання відбулося в момент часу $t_1 = \frac{3}{2\pi\omega}$. Надалі, також як і раніше, впливом невеликого початкового зрушення $\omega\frac{T_1}{2}$. на миттєві значення Е.Р.С. нехтуємо.

При числових даних, у момент гасіння дуги $u_{N0} = 1,48E_{\Phi m}$. На рис. 4.9 ілюструються описувані перехідні процеси при одержанні яких прийнято: $t = 0,\quad d = 0,05,\quad T_1 = 10^{-3}c,\quad \upsilon = 0.$ Процеси зміни напруги на ушкодженій фазі й напрузі на нейтралі показані в різних масштабах часу – для 2-х періодів промислової частоти (рис. 4.9, а, б, в) і для 20 періодів (рис. 4.9, г, д).

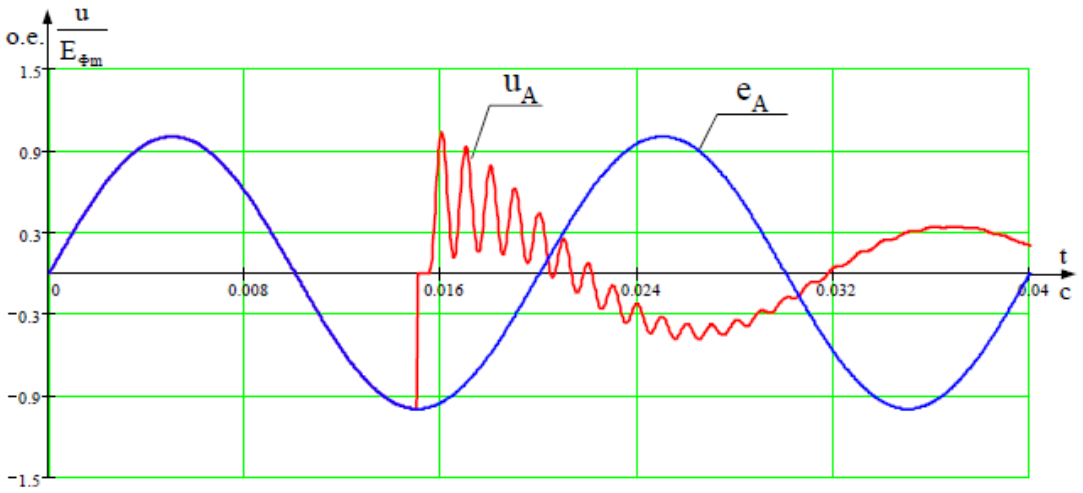
Далі розглянемо процес, коли дуга гасне при проходженні через нуль примушеної складової струму замикання. З (4.16) і (4.18) випливає, що параметри υ і d рівні відповідно до реактивної й активної складовим струму замикання, віднесеним до сумарного ємнісного струму, тому миттєве значення струму, що встановився замикання пов'язане з, що встановився напругою на нейтралі $u_N = -E_{\Phi m}\sin(\omega t)$ наступним чином

$$i_3 = -E_{\Phi m}3C_\Phi\omega(d\sin\omega t+\upsilon\cos\omega t). \qquad (4.36)$$

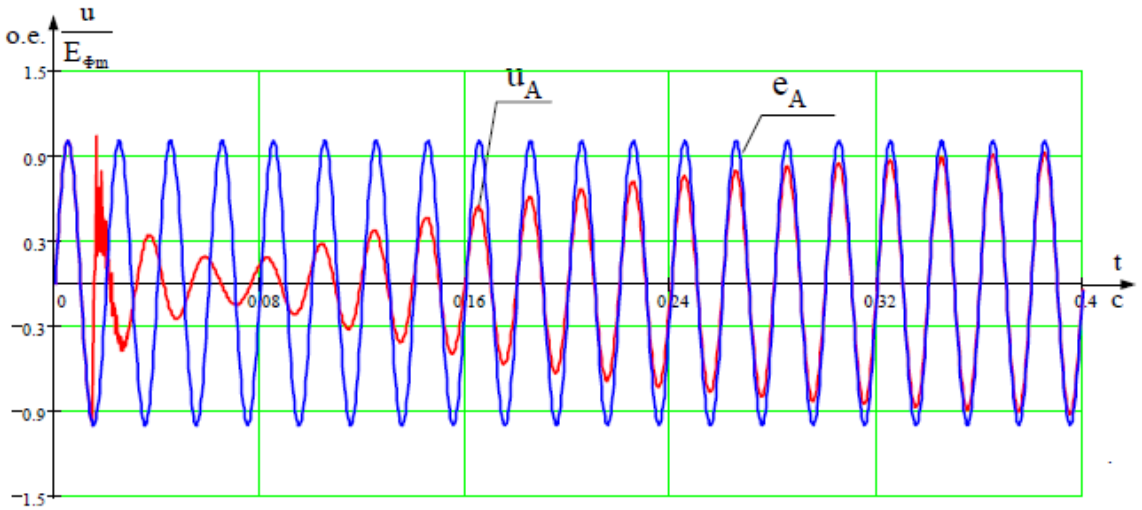
Момент переходу струму замикання через нуль визначається рішенням рівняння (4.36) при $i_3 = 0$, що дає

$$\varphi_{гаш} = \omega t_{гаш} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{\upsilon}{d}\right), \qquad (4.37)$$

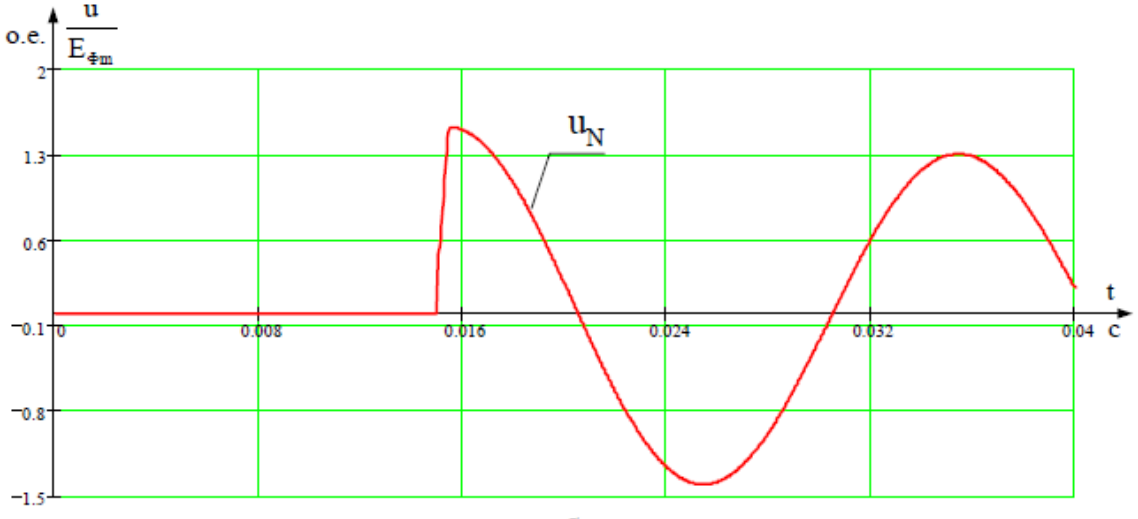
де $\varphi_{гаш}$ – фазовий кут між моментами проходження через нуль Е.Р.С. джерела ушкодженої фази й струму замикання.



а

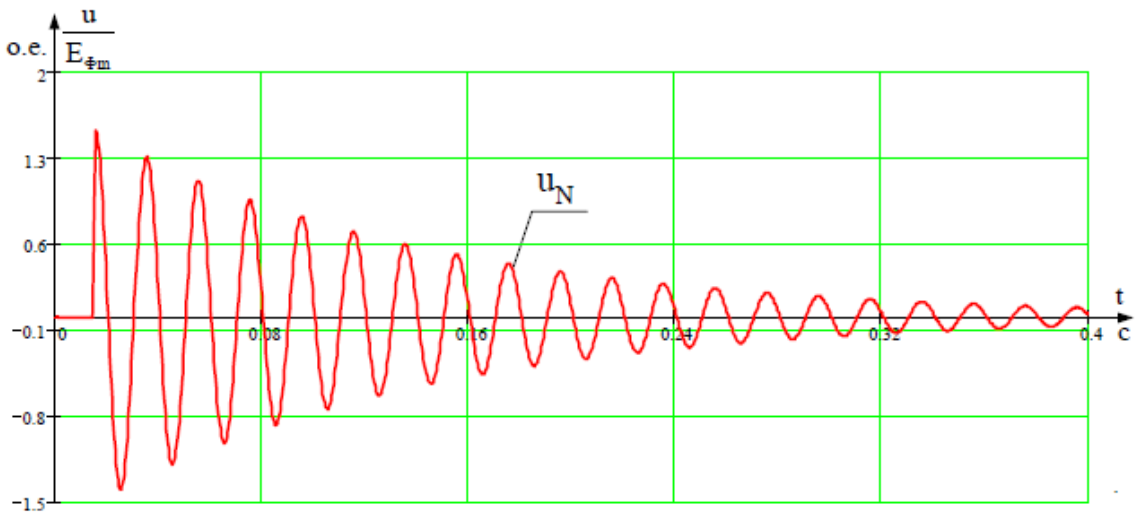


в

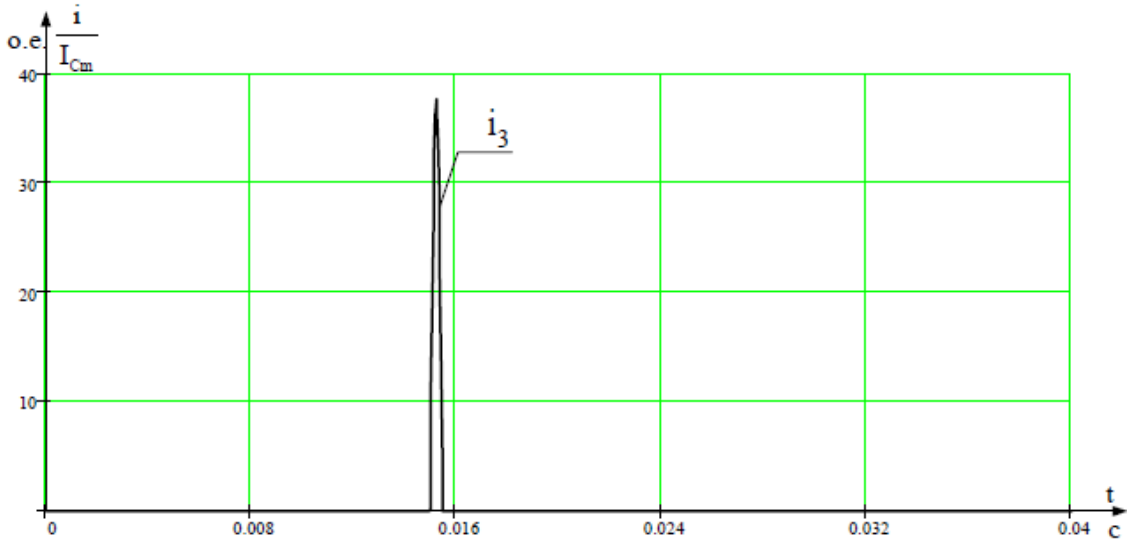


б

Рис. 4.9 – Процеси зміни напруги



г



д

Рис. 4.9 – Продовження рисунку 4.9

На рисунку 4.9:

а) – процес відновлення напруги на ушкодженій фазі протягом двох півперіодів промислової частоти;

б) – напруга на нейтралі протягом двох півперіодів промислової частоти; в – процес відновлення напруги на ушкодженій фазі протягом десяти півперіодів промислової частоти;

г) – напруга на нейтралі протягом десяти півперіодів промислової частоти;

д) – вільна складова струму замикання; (дуга гасне при першім проходженні через нуль)

При гасінні дуги, коли через нуль проходить примушена складова струму замикання, при будь-якій комбінації υ і d миттєве значення Е.Р.С. джерела ушкодженої фази протилежно за знаком напруги на нейтралі, тобто $e_A + u_N = 0$. Тому високочастотний процес відновлення напруги відсутнійі напруга на пошкодженій фазі з моменту гасіння дуги змінюється у відповідності з наступним співвідношенням

$$u_A = E_{Фm}\left[\sin(\omega t + \varphi_{гаш}) - e^{-\frac{d}{2}\omega t}\sin(\omega_3 t + \varphi_{гаш})\right]. \qquad (4.38)$$

Процес відновлення напруги на ушкодженій фазі по (4.38) при υ = 0,05 і d = 0,05 ілюструється на рис. 4.10.

Таким чином, як видне з рис. 4.10, у цілому заземлення нейтралі через дугогасильний реактор, настроєний у резонанс із сумарною ємністю мережі щодо землі, приводить до істотного уповільненню відновлення напруги на ушкодженій фазі. Ця обставина є одним з факторів сприятливих гасінню дуги, тому що за час відновлення напруги може відбуватися деіонізація дугового проміжку.

Далі розглянемо процес відновлення напруги на пошкодженої фазі більш детально для того, щоб з'ясувати вплив різних факторів на швидкість відновлення напруги. Проведений нижче аналіз виходить більш простим і наочним у випадку загасання дуги при проходженні примушеної складової струму через нуль, тому за основу ухвалюємо співвідношення (4.38).

Графіки напруги, що відновлюється, побудовані у відповідності з (4.36) і (4.38) при різних комбінаціях υ і d, наведені на рис. 4.11. При точному настроюванні компенсації (υ = 0) і d ≠ 0, як слідує з (4.42), $\omega_3 \approx \omega$ і тому

$$u_A = \left(1 - e^{-\frac{d}{2}\omega t}\right) E_{Фm}\sin(\omega t + \varphi_{гаш}). \qquad (4.39)$$

Таким чином, при точнім настроюванні компенсації напруга на ушкодженій фазі відновлюється за експонентним законом з постійної часу $\tau_в = \frac{2}{d\omega}$. При υ = 0 у процесі відновлення напруга не підвищується вище амплітуди фазної робочої напруги.

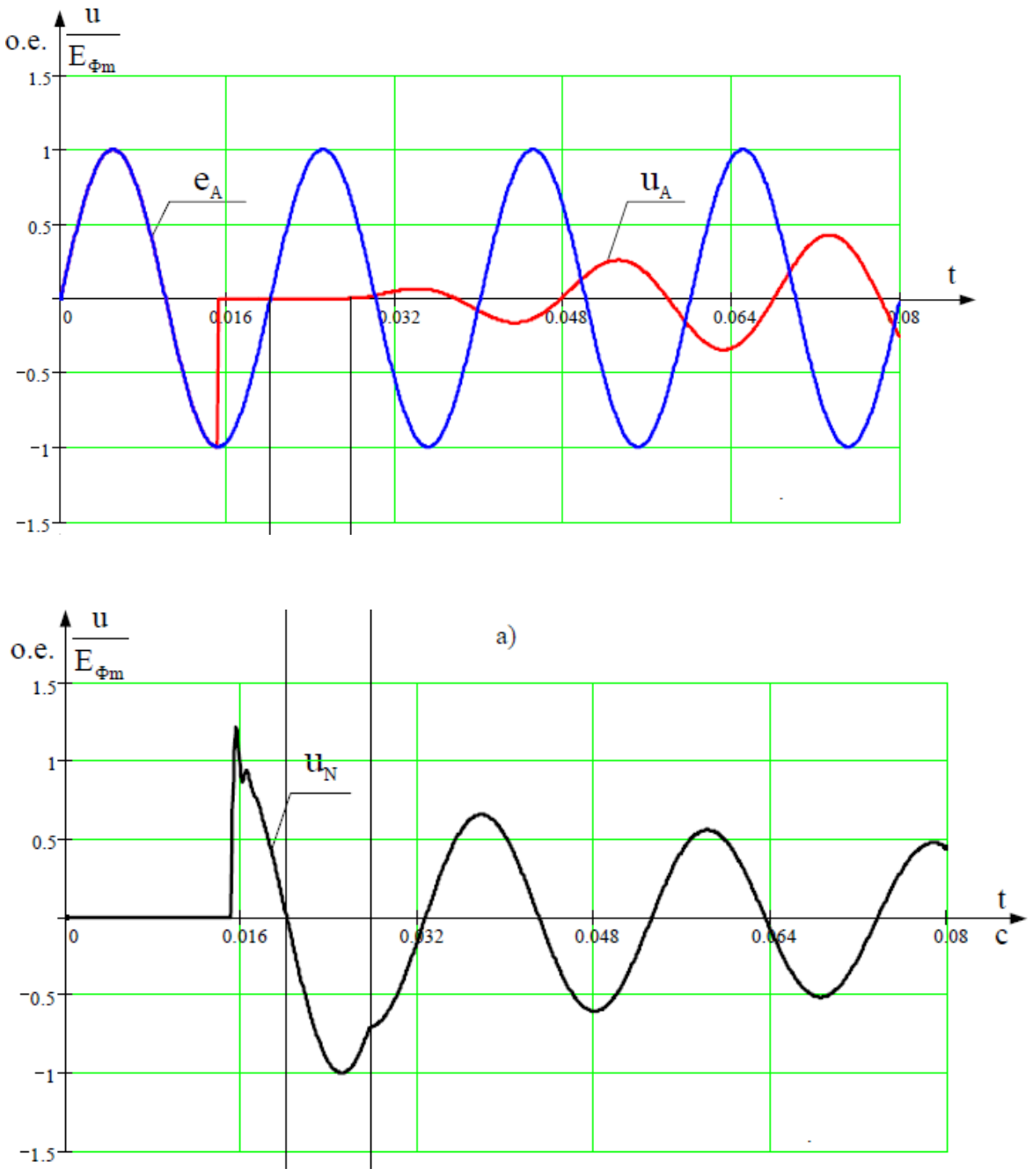
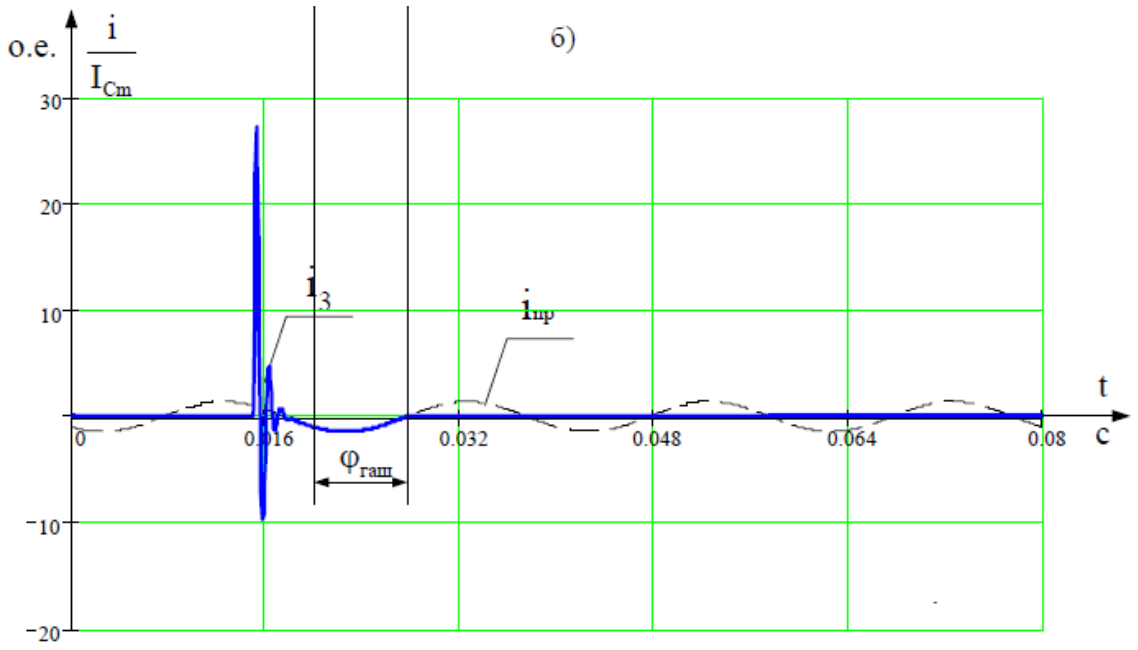
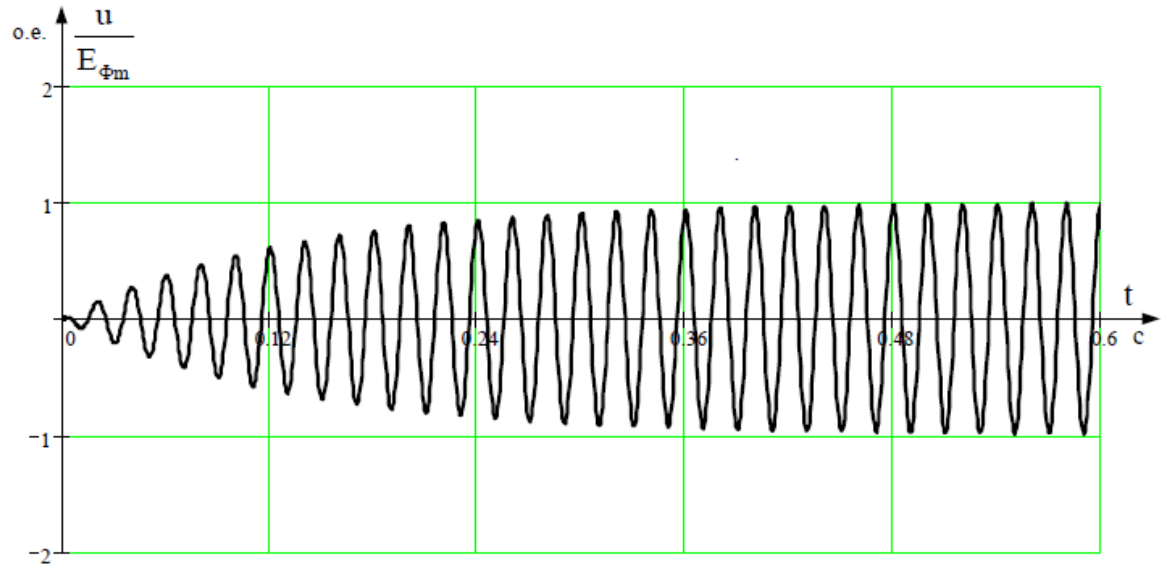


Рис. 4.10 - Процес відновлення напруги на ушкодженій фазі й на нейтралі після гасіння дуги при першім проходженні через нуль примушеної складової струму замикання при υ = 0,05 і d = 0,05



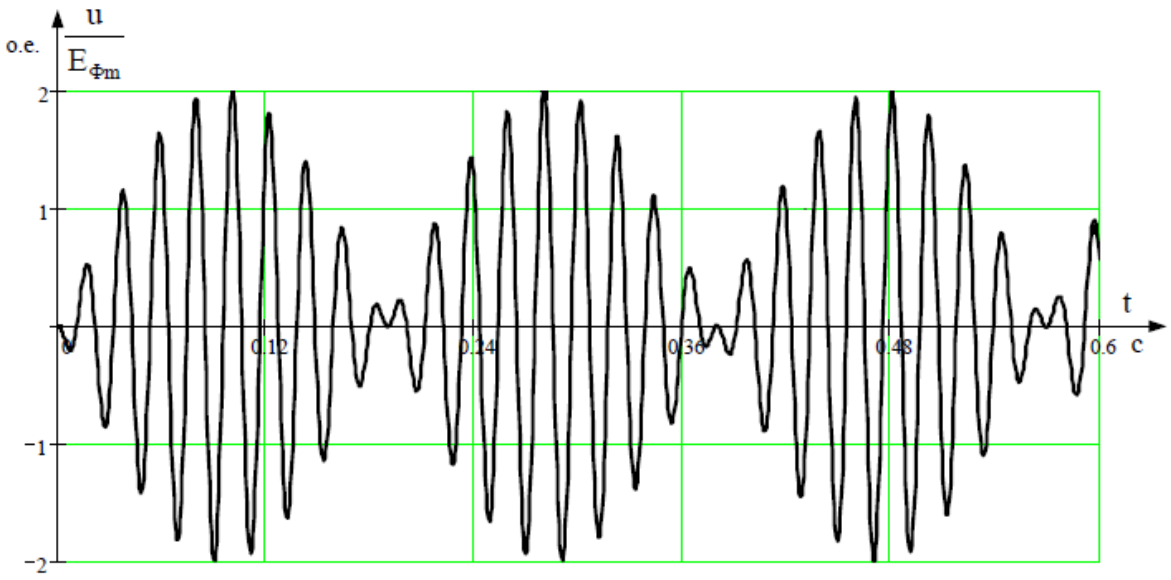
в)

Рис. 4.10 - Продовження рисунку 4.10

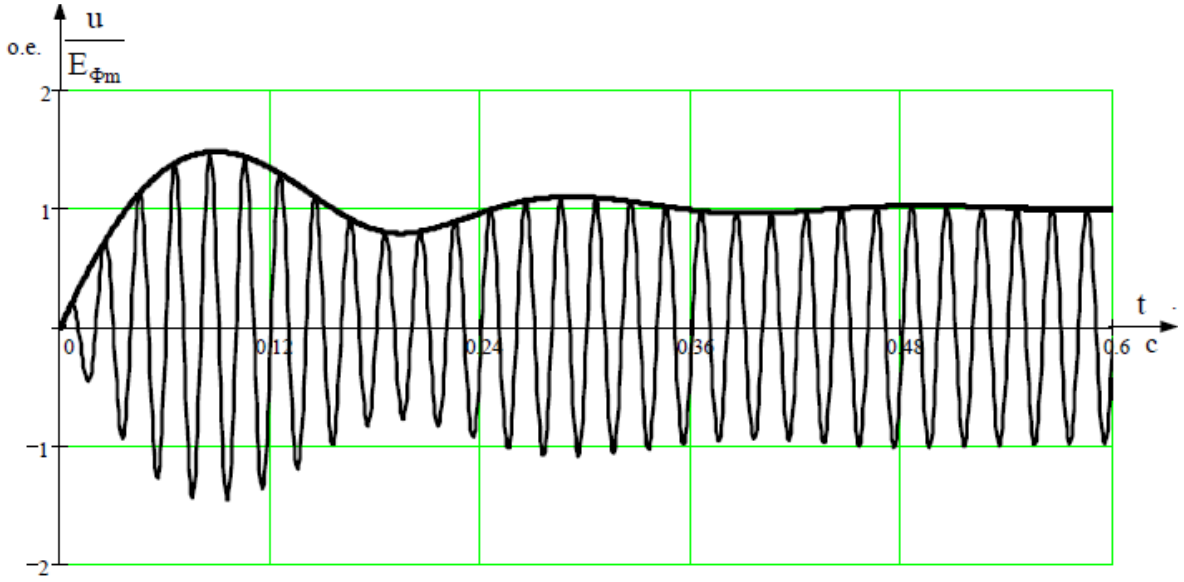


а)

Рис. 4.11 - Напруга, що відновлюється, на ушкодженій фазі після гасіння дуги



б)



в)

Рис. 4.11 - Продовження рисунку 4.11:

а) – при υ = 0, d = 0.05; б) – при υ = 0.2, d = 0; в) – при υ = 0.2, d = 0.05

Якщо прийняти практично нереальний випадок, коли $\upsilon \neq 0$ і $d = 0$, і врахувати, що при цьому $\omega_з = \omega\sqrt{1-\upsilon}$, отримаємо

$$u_A = 2E_{Фm} \sin\left(\frac{1-\sqrt{1-\upsilon}}{2}\omega t\right) \cdot \cos\left(\frac{1+\sqrt{1-\upsilon}}{2}\omega t + \varphi_{гаш}\right). \qquad (4.40)$$

У цьому випадку напруга на ушкодженій фазі представляє процес, який прийнято називати биттям (рис. 4.11, б). Частота дорівнює напіврізниці, що обгинає биттів, робочої частоти мережі й частоти вільних коливань напруги на нейтралі $\frac{1}{2}(\omega-\omega_з)=\frac{1}{2}\omega(1-\sqrt{1-\upsilon})$, а частота мінливої напруги – полусумі цих частот $\frac{1}{2}(\omega+\omega_з)=\frac{1}{2}\omega(1+\sqrt{1-\upsilon})$.

Вочевидь, що при відсутності втрат $(\delta=0)$ існували б нескінченно довго, що, безумовно, неприпустимо, тому що при цьому довгостроково спотворювалися б фазні напруги, навіть після остаточного загасання дуги. Втрати приводять до загасання (демпфуванню коливань), чому й пояснюється присвоєння коефіцієнту d терміна коефіцієнт демпфірування.

У реальних мережах необхідно враховувати, що одночасно $\upsilon \neq 0$ і $d \neq 0$. У цьому випадку напруга на ушкодженій фазі також має характер биттів з одночасним загасанням амплітуди (рис. 4.11, в).

Відхилення настроювання дугогасильного реактора від резонансної, як видне, може привести до того, що, через деякий час, напруги на ушкодженій фазі навіть перевищить робоча фазна напруга. Однак і в цьому випадку швидкість відновлення напруги значно менше, чим у мережі з ізольованої нейтраллю, тому що вона визначається не робочою частотою мережі, а частотою, що обгинає напругу по (4.40). Навіть при більш, що рідко мають місце, розладах компенсації, частота, що обгинає багато менше робочої частоти. Так, наприклад, при $\upsilon = 0{,}2$ і $\upsilon = -0{,}2$ частоти обвідної відповідно рівні 0, 052ω і 0, 048ω.

Слід також зазначити, що напруги на неушкоджені фазах при переході до нормальних фазних напруг після гасіння дуги також мають характер биттів, тому що

$$\begin{aligned} u_B &= e_B + u_N, \\ u_C &= e_C + u_N. \end{aligned} \qquad (4.41)$$

4.4. Перенапруги при дугових замиканнях у мережі з компенсацією ємнісних струмів

Механізм формування напруг на неушкоджених фазах при дугових замиканнях у мережі з компенсацією ємнісного струму такий же, як і в мережі з ізольованої нейтраллю. Це пояснюється тим, що заземлення нейтралі через дугогасильний реактор не впливає на перехідний процес зміни зарядів ємностей неушкоджених фаз, викликаний замиканням на землю (що починається в момент запалювання дуги). Тією самою мірою тут можливі допущення, прийняті для розгляду цього питання в мережі з ізольованої нейтраллю. Наприклад, допущення про незмінність примушеного напруги на непошкодженої фазі за половину періоду вільних коливань частоти ω_1. Тому в загальному випадку максимальне значення напруги на непошкоджених фазах впродовж деякого часу, дорівнює $\frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}$ після запалювання дуги може бути визначене (для фази В) наступним чином

$$u_{BM} = e_{AB}(t_1) + \left[e_{AB}(t_п) - u_B(t_п)\right](1 - k_{δ1})(1 - k_C). \qquad (4.42)$$

Вираження у квадратних дужках в (4.42) – є початкова амплітуда вільної складової напруги частоти ω_1 без обліку впливу міжфазних ємностей. Як було показано вище (3.18), ця величина дорівнює напрузі на ушкодженій фазі в момент запалювання дуги. Отже,

$$u_{BM} = e_{AB}(t_1) + u_A(t_1)(1 - k_{δ1})(1 - k_C). \qquad (4.43)$$

Далі необхідно виявити умови, при яких величина u_{BM} має можливі найбільші значення й, що важливо в цьому випадку, залежність цього найбільшого значення від розладу компенсації υ. Спочатку виявимо умови, при яких після загасання дуги напруга, що відновлюється на ушкодженій фазі по (4.39) або по (4.40) має максимальне значення. Очевидно, що це буде мати місто, коли Е.Р.С. ушкодженої фази джерела й напруга вольних коливань на нейтралі одночасно досягають амплітудних значень одного

знака або, що одне й теж, коли досягається максимум, що обгинає биттів напруги на ушкодженій фазі.

Через відмінність частот Е.Р.С. джерела й вільних коливань напруги на нейтралі фазове зрушення між ними змінюється за законом $\Delta\varphi = (\omega - \omega 3)\ t$. Сполучення амплітуд e_A й u_N, як випливає із (4.39), (4.40), має місце через час t_M після гасіння дуги, що задовольняє умові

$$(\omega - \omega_3)\ t_M = \pm\pi. \qquad (4.44)$$

Знак «+» в (4.44) відповідає недокомпенсації ($\upsilon > 0$), коли $\omega > \omega_3$, а знак «–» перекомпенсації ($\upsilon < 0$), коли $\omega < \omega_3$. Далі, приймаємо, як і раніше, $\omega_3 \approx \omega\sqrt{1-\upsilon}$, відрізок часу t_M будемо визначати по формулі

$$t_M = \frac{\pi}{\omega\left|1-\sqrt{1-\upsilon}\right|}. \qquad (4.45)$$

Таким чином, максимальна напруга на ушкодженій фазі за умови, коли дуга гасне при проходженні через нуль сумарного струму замикання відповідно до (4.35) дорівнює

$$u_{AM} = E_{\Phi m} + U_{Nm} e^{-\frac{d}{2}\omega t_M}. \qquad (4.46)$$

При гасінні дуги при проходженні через нуль примушеного значення струму замикання по (4.38) одержимо

$$u_{AM} = E_{\Phi m} + E_{\Phi m} e^{-\frac{d}{2}\omega t_M}. \qquad (4.47)$$

На рис. 4.12 представлена залежність найбільшої напруги u_{AM} від розладу компенсації, отримана по співвідношеннях (4.46) і (4.47). Із цієї залежності випливає, що очікувані перенапруги суттєво залежать від розладу компенсації.

Щоб одержати оцінку теоретично можливих перенапруг, слід урахувати наступну особливість перехідних процесів у компенсованої мережі, що полягає в тому, що в момент, коли досягнутий максимум напруги на ушкодженій фазі, примушена напруга на неушкоджених фазах може мати

будь-яке значення, у тому числі й максимальне, рівне $\sqrt{3}E_{Фm}$. Це пояснюється, по-перше, тим, що частота напруги, що відновлюється, на ушкодженій фазі $\omega\frac{1+\sqrt{1-\upsilon}}{2}$ у загальному випадку не кратна робочій частоті джерела живлення.

По-друге, важливо також і те, що період биттів у реальному діапазоні можливих значень розладу компенсації υ значно більше періоду змінної напруги на нейтралі. Тому в області максимуму, що обгинає попадає кілька амплітуд напруги на ушкодженій фазі, близьких за значенням до u_{AM} по (4.46) або по (4.47).

Наприклад, при недокомпенсації в 20% (υ = 0,2) амплітуди напруги в моменти часу випереджальні й відстаючі від моменту t_M на $\frac{2\pi}{\omega_3}$ зменшуються всього лише на 6% (рис. 4.13).

Як видне, в області максимуму, що обгинає на ушкодженій фазі повторне запалювання дуги може відбутися поблизу моменту однієї з максимумів напруги. З (4.43) випливає, що максимальна перенапруга буде при запалюванні дуги, наприклад, у момент t_3 (рис. 4.13), тому що в цей момент і напруга на ушкодженій фазі практично найбільша й примушена напруга на неушкодженій фазі близька до амплітудного.

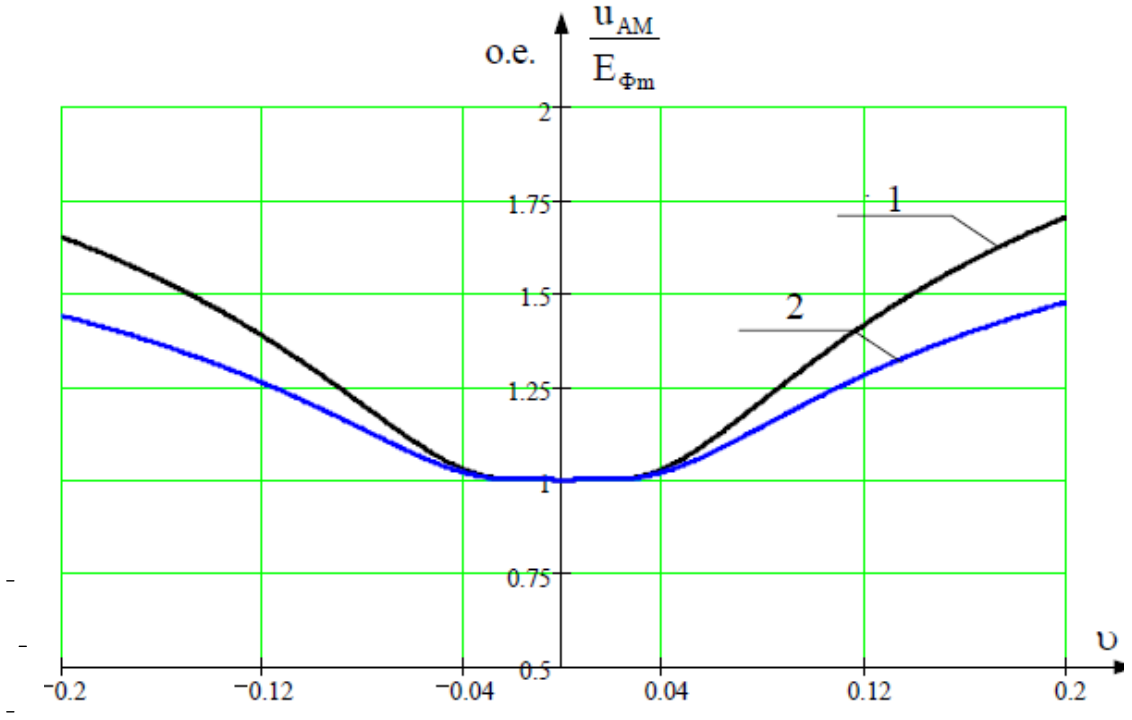


Рис. 4.12 - Максимальне, що відновлюється напруга на ушкодженій фазі після гасінні дуги при d = 0,05: 1 – при проходженні через нуль сумарного струму замикання; 2 – при проходженні через нуль примушеного значення струму замикання

Таким чином, при прийнятих умовах розрахункова перенапруга буде дорівнювати

$$u_{BM} = \sqrt{3}E_{Фm} + u_{AM}(1 - k_{\delta 1})(1 - k_C). \qquad (4.48)$$

Визначимо перенапруги при наступних умовах і параметрах: υ = 0,3 (недокомпенсація), d = 0,05, $k_{\delta 1}$ =0,1, k_C = 0,2, u_{NM} = 1,48$E_{Фm}$. При цих вихідних даних u_{BM} = 3,1 $E_{Фm}$.

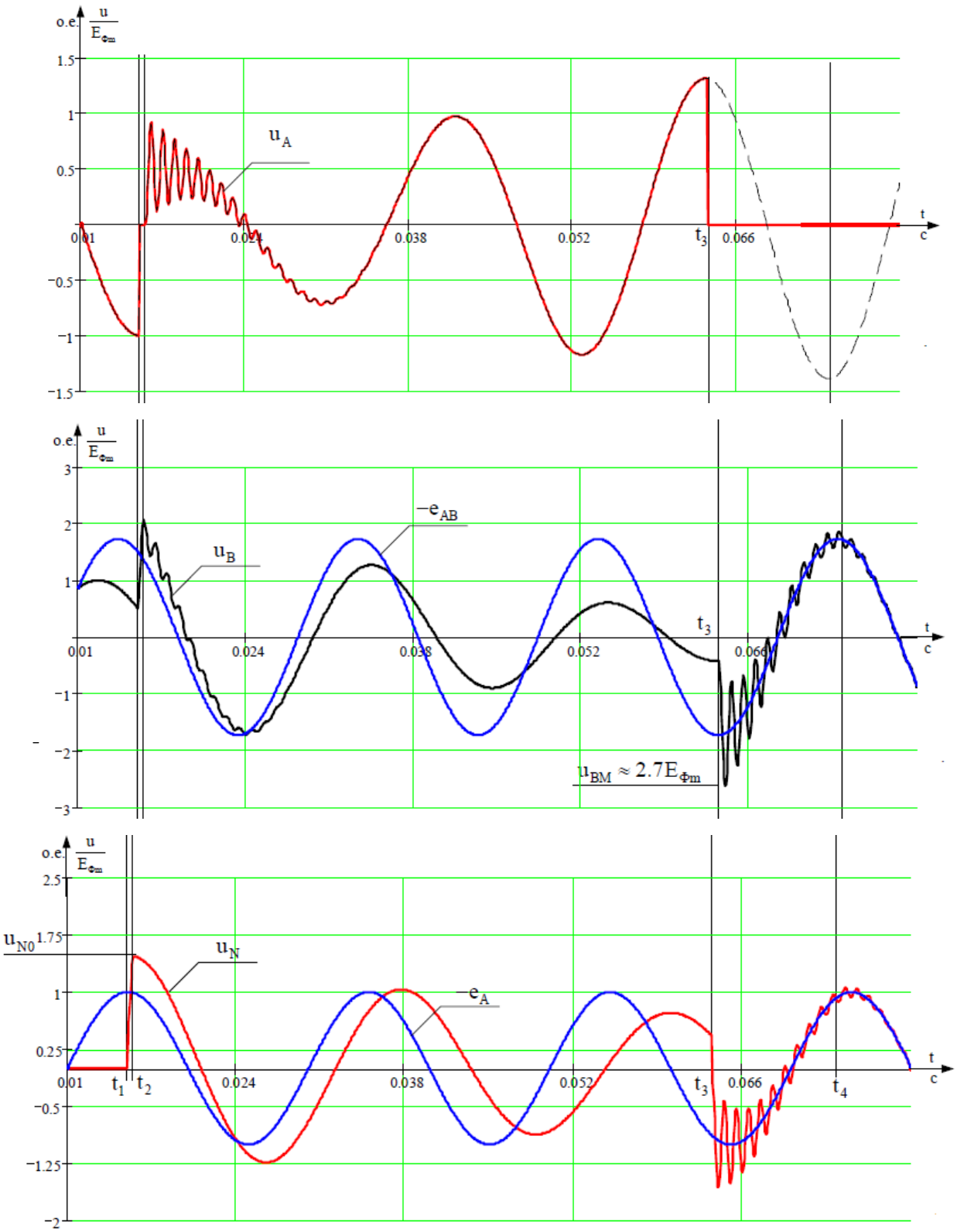


Рис. 4.13 - Процес формування перенапруг на неушкодженій фазі в мережі з компенсацією ємнісного струму υ = 0,2, d = 0,05

Однак, слід врахувати, що, по-перше, збіг моменту досягнення максимуму, що відновлюється напруги з моментом, коли примушене напруга $e_{AB} = \sqrt{3}E_{Фm}$, малоймовірно й, вдруге, таке допущення дає завищене значення перенапруг при точнім настроюванні компенсації (υ = 0). При υ = 0 після загасання напруги на нейтралі й запалюванні дуги при $u_A = E_{Фm}$ примушені напруги на неушкоджених фазах дорівнюють $1{,}5E_{Фm}$.

Тому перенапруги не можуть перевищувати їхніх значень при першім запалюванні дуги.

Отже, ухвалюючи значення примушеного напруги рівним $3E_{Фm}$, одержимо неправильну виставу про фактичний вплив точності настроювання компенсації ємнісних струмів на зниження можливих перенапруг.

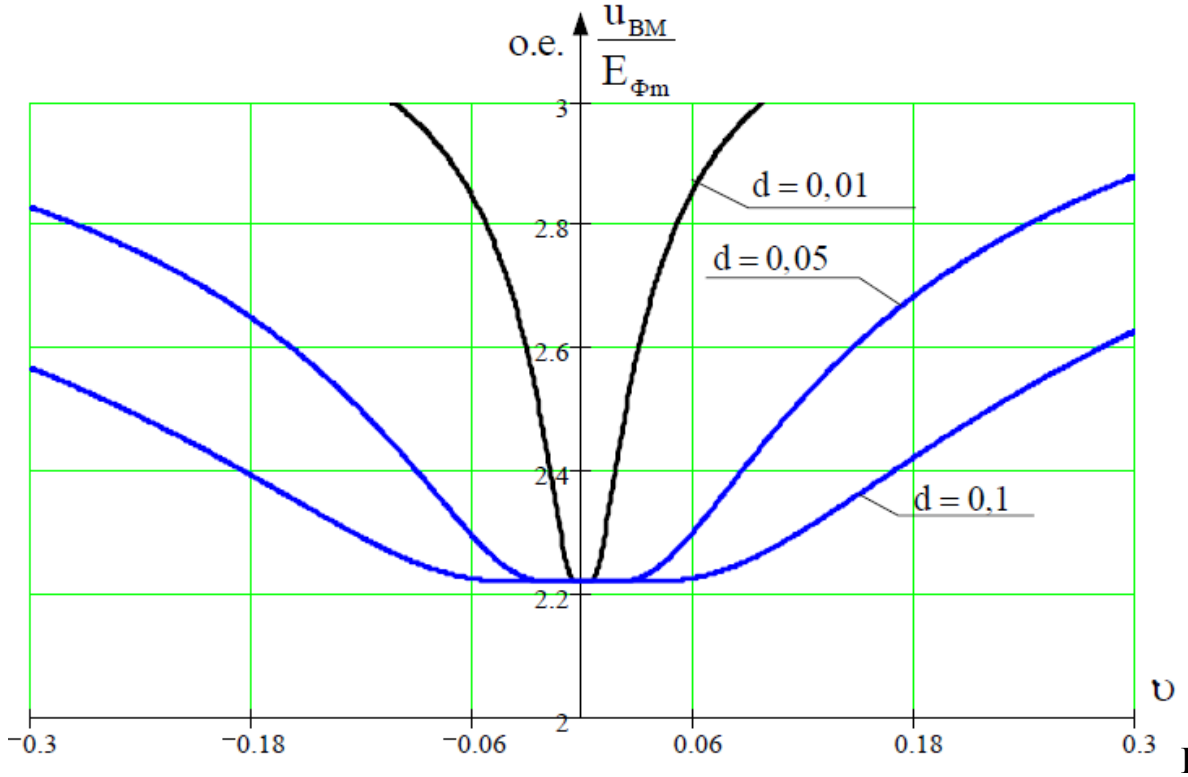


Рис. 4.14 - Розрахункові перенапруги на неушкодженій фазі при повторних запалюваннях дуги

У зв'язку з викладеним, вплив розладу компенсації й коефіцієнта демпфірування на перенапруги будемо розглядати, приймаючи примушену напругу $e_{AB} = 1{,}5E_{Фm}$. Таким чином, з обліком співвідношень (4.43), (4.45)

одержимо

$$u_{BM} = 1,5E_{\Phi m} + \left[E_{\Phi m} + U_{Nm} e^{\frac{d\pi}{2\left|1-\sqrt{1-\upsilon}\right|}} \right] (1 - k_{\delta 1})(1 - k_C). \qquad (4.49)$$

На рис. 4.14 по (4.49) побудовані залежності можливих перенапруг на неушкодженій фазі В від розладу компенсації при різних значеннях коефіцієнта демпфірування d. У розрахунках, як і раніше, прийняте $u_{NM} = 1,48E_{\Phi m}, k_{\delta 1} = 0,1, k_C = 0,2$.

4.5. Вплив точності настроювання компенсації ємнісних струмів на процеси, що визначають ефективність компенсації

При застосуванні компенсації ємнісного струму природно виникає питання про припустимі відхилення від точного настроювання дугогасильних пристроїв. При цьому, мабуть, що розлад компенсації не повинна перевищувати значення, при яких можливо помітне зниження ефективності від застосування компенсації ємнісних струмів.

У деяких роботах, визначається, що поняття ефективності компенсації ємнісних струмів визначене, як здатність дугогасильних апаратів (реакторів) обмежувати:

- струми через місце ушкодження;
- перенапруги;
- швидкості напруг, що відновлюються, після гасіння заземляючої дуги.

Крім того враховується кількісний показник ефективності компенсації, як частка замикань на землю, що не перейшли у короткі замикання, від загального числа замикань

$$Ек=1- n_{заг}/n_{к.з}[(n_{заг}-n_{к.з})/ n_{заг}],$$

де $n_{заг}$ та $n_{к.з.}$ – відповідно загальне число замикань на землю й число замикань, які перейшли у короткі замикання.

Можливі різні причини переходу однофазного замикання в міжфазні. При замиканні в кабелі може мати місце ушкодження ізоляції інших фаз за рахунок теплової дії струму однофазного замикання. Досить розповсюдженою причиною переходу однофазних замикань у міжфазні (подвійні замикання на землю) є пробій ізоляції на одній з неушкоджених фаз через перенапруги, що виникають при повторних запалюваннях дуги.

Значимість наведених вище трьох факторів, від яких залежить ефективність компенсації, різна залежно від місця однофазного замикання (закрита або відкрита дуга), загального рівня ізоляції мережі й інших обставин.

При розгляді впливу розладу компенсації на залишковий струм замикання слід враховувати, що практично завжди цей струм стримує вищі гармоніки

$$I_з = I_C \sqrt{d^2 + x^2 + \sum I_{\nu*}^2},$$

де $I_з$ – сумарний ємнісний струм;

Iν* – відносне діюче значення k-*ой* гармоніки струму замикання.

Частка вищих гармонік може бути значної, тому що емностний струм за інших рівних умов пропорційний номеру гармоніки. Таким чином, відносний вплив порівняно невеликих расстроєк компенсації на діюче значення залишкового струму ослаблюється.

У ряді робіт на основі теоретичних досліджень і досвіду експлуатації більшу значимість надають факторові швидкості напруг, що відновлюються або, однозначно зв'язаному зі швидкістю, часу відновлення напруги на ушкодженій фазі до значення, близького до амплітуди номінальної фазної напруги.

Зниження цього часу на певну величину рекомендується як захід для прізначення максимально припустимого розладу компенсації.

За основу для визначення часу відновлення ухвалюється рівняння для,

що обгинає напруги, що відновлюється, відповідна процесу при загасанні дуги, коли через нуль проходить примушена складова струму (4.38). Миттєве значення обвідної дорівнює абсолютній величині різниці векторів (рис. 4.15), відображаючих складові вираження (4.38).

Тому що поточне значення кута δ на векторній діаграмі (рис. 4.15) дорівнює $\omega t(1-\sqrt{1-\upsilon})$, то формула для, що обгинає буде мати вигляд

$$U_{ог} = E_{Фm} + \sqrt{1 + e^{-d\omega t} - 2e^{-\frac{d}{2}\omega t}\cos(1-\sqrt{1-\upsilon})\omega t}\,. \qquad (4.50)$$

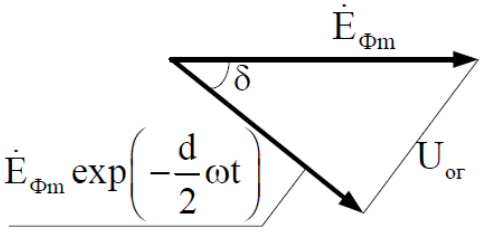


Рис. 4.15 - Векторна діаграма до виводу формули для напруги, що обгинає та відновлюється

Вирішуючи рівняння $U_{зад} = U_{ог}$ відносно t, одержимо залежність часу відновлення напруги від υ і d.

На рис. 4.16 наведені залежності часу відновлення напруги до значення, рівного 0,9 $E_{Фm}$.

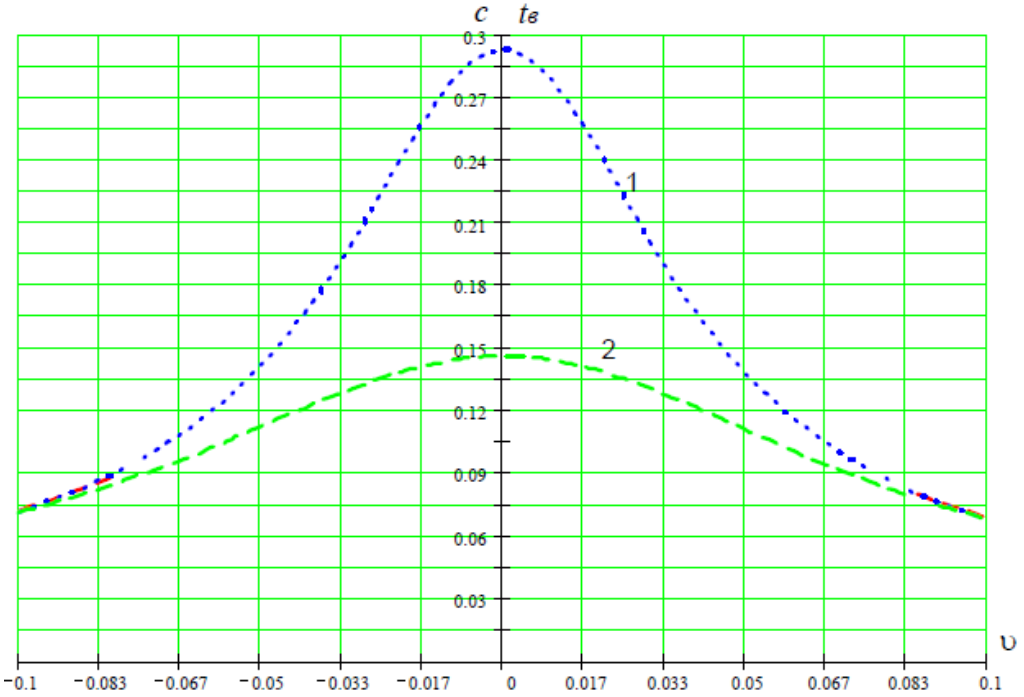


Рис. 4.16 - Залежності розрахункового часу відновлення напруги до 0,9 $E_{Фm}$: 1 – при d = 0,05; 2 – при d = 0,1

В деяких випадках у якості характеристики швидкості відновлення напруги використовується початкова швидкість зростання, що обгинає напругу, яку одержують по виразу (4.50).

Початкова швидкість наростання напруги, що обгинає, може бути знайдена також за допомогою векторної діаграми, але з обліком того, що розглядається початкова стадія процесу по закінченні малого відрізка часу $\Delta\tau$.

Векторна діаграма для таких умов і необхідні додаткові побудови й позначення наведені на рис. 4.17.

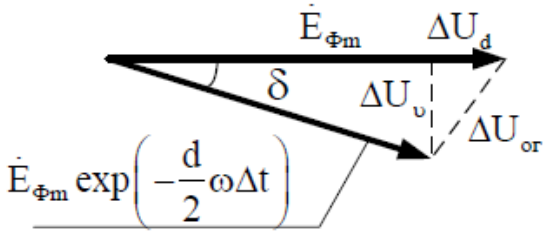


Рис. 4.17 - Векторна діаграма до визначення початкової швидкості напруги, що відновлюється та обгинає

З діаграми (рис. 4.17) $\Delta U_{or} = \sqrt{\Delta U_d^2 + \Delta U_\upsilon^2}$.Величини ΔU_d та ΔU_υ з урахуванням малості кута δ рівні

$$\Delta U_d \approx E_{\Phi m} - E_{\Phi m} \exp\left(-\frac{d}{2}\omega\Delta t\right),$$
$$\Delta U_\upsilon \approx E_{\Phi m} \sin(1 - \sqrt{1-\upsilon})\omega\Delta t. \qquad (4.51)$$

Тому що Δτ мала величина, то в розкладанні функцій часу в статечні ряди можна не враховувати члени, що містять малі величини в ступені вище першої. Крім того, враховуючи, що розлад компенсації також обмежена порівняно малою величиною одержимо $\sqrt{1-\upsilon} \approx 1 - \frac{1}{2}\upsilon$.

Вираження (4.51) тоді приймуть вид

$$\Delta U_d \approx E_{\Phi m}\frac{d}{2}\omega\Delta t,$$
$$\Delta U_\upsilon \approx E_{\Phi m}\frac{\upsilon}{2}\omega\Delta t. \qquad (4.52)$$

Миттєві значення, що обгинає в початковій стадії

$$U_{or} = E_{\Phi m}\frac{\omega}{2}\Delta t\sqrt{d^2 + \upsilon^2}\,, \qquad (4.53)$$

а шукана початкова швидкість $E_{\Phi m}$

$$\frac{du_{or}}{dt} = \frac{\Delta u_{or}}{\Delta t} = E_{\Phi m}\frac{\omega}{2}\sqrt{d^2 + \upsilon^2}\,. \qquad (4.54)$$

Як видне, по (4.54) параметри d і υ однаковою мірою впливають на початкову швидкість зростання, що обгинає напруги, також як і на значення залишкового струму робочої частоти.

На закінчення дамо порівняльну оцінку ступеня впливу відхилення настроювання компенсації на зміну факторів, що впливають на ефективність компенсації. У якості критерію ступені впливу приймемо розлад компенсації, при якій значення фактора змінюється на 10% при d = 0,05. Результати розрахунків зведено в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків

Фактор	Розлад компенсації, при якій значення фактора змінюється на 10% при d = 0,05
Час відновлення напруги до $0{,}9U_{Фm}$	±1,5%
Початкова швидкість відновлення напруги	±2,3%
Залишковий струм у місці замикання без обліку вищих гармонік	±2,3%
Перенапруги при дугових замиканнях	–14%, +13 %

Таким чином, при прийнятих розрахункових умовах найбільше відчутний до розладу компенсації є час відновлення напруги до заданого значення після загасання дуги, а найменш чутливим – перенапруги при повторних запалюваннях і загасання дуги.

ТЕМА 5. МЕРЕЖІ З РЕЗИСТИВНИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ НЕЙТРАЛІ

Режим ізольованої нейтралі має істотний недолік, що полягає в можливості появи більших перенапруг при повторних запалюваннях дуги. Причиною більших перенапруг є залишкова напруга на нейтралі, обумовлене надлишковими зарядами на ємностях фаз мережі, які не встигають стікати до чергового запалювання дуги через природні провідності між фазами мережі й землею. Тому зовсім очевидним способом зниження перенапруг є створення шляху для стікання надлишкових зарядів за допомогою заземлення нейтралі мережі через резистор з таким опором, при якім практично повне стікання надлишкових зарядів забезпечується до моменту можливого повторного запалювання дуги, тобто за половину періоду промислової частоти.

При цьому слід зазначити, що при виборі опору заземлюючого резистора тільки із цієї умови, струм у місці замикання збільшується не набагато (приблизно в 1,5 рази), і тому в більшості випадків, також як і при ізольованої нейтралі й при компенсації ємнісного струму, припустима робота мережі при однофазному замиканні протягом деякого часу.

Пропозиції по застосуванню резистивного заземлення нейтралі відомі давно. Відомі пропозиції, згідно з якими слід ухвалювати такий опір заземлюючого резистора, при якому активна складова струму замикання становить 30, 60 А. У цьому випадку мережа повинна бути оснащена швидкодіючим захистом від замикань на землю, що діє на відключення, тому що тривале протікання таких струмів у місці замикання неприпустимо.

При цьому немаловажне відзначити, що виконання захисту від замикань на землю при струмах замикання 30 ÷ 60 А при інших рівних умовах спрощується. Простота виконання швидкодіючого селективного захисту є одним з аргументів на користь такого вибору опору заземлюючого резистора. При цьому потужність заземляючого резистора може вибиратися з умови протікання по ньому струму протягом невеликого проміжку часу.

Заземлення нейтралі через активний опір прийняте коротко називати – резистивним заземленням нейтралі. Основна область застосування резистивного заземлення нейтралі – мережі з порівняно невеликими ємнісними струмами, при яких ще не рекомендується, по існуючих нормах, установка дугогасильних реакторів.

Найпоширенішим видом таких мереж є мережі 6 кВ власних потреб електростанцій, мережі, що живлять пересувні механізми відкритих гірських розробок, а також повітряні розподільчі мережі 6 ÷ 35 кВ.

Заземлюючий резистор, також як і дугогасильний реактор, може підключатися до нейтралі спеціального трансформатора із з'єднанням обмоток зірка – трикутник або до якого-небудь силового трансформатору, у якого є обмотка, з'єднана в трикутник (рис. 5.1). Із приводу співвідношення опору трансформатора й опору заземлюючого резистора слушні ті ж зауваження, які зроблені при розгляді схеми підключення дугогасильного реактора.

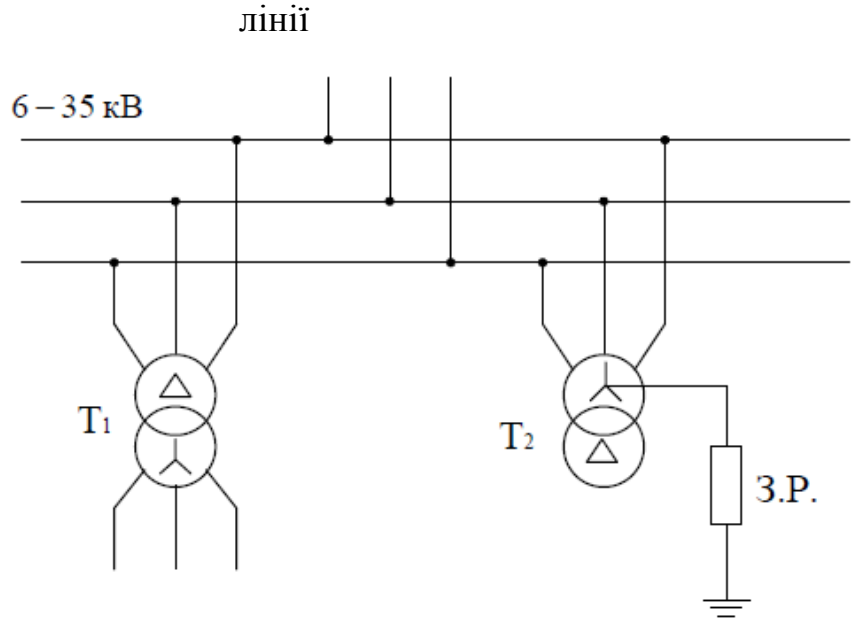


Рис. 5.1 - Схема мережі з резистивним заземленням нейтралі З.Р. – заземлюючий резистор

Якщо при резистивному заземленні нейтралі струм залишається на такому рівні, що можлива тривала робота мережі при однофазному

замиканні, то такий режим прийняте умовно називати високоомним резистивним заземленням. Якщо ж збільшення струму таке, що тривала робота мережі при замиканні на землю неприпустима, то режим умовно називають низькоомним резистивним заземленням.

Важливо також звернути увагу на те, що навіть при резистивному заземленні, що створюють активну складову струму в десятках ампер і умовно називаним низькоомним, еквівалентний опір нульової послідовності набагато більше опору прямої і зворотної послідовностей. Тому при резистивному заземленні, також як у мережі з ізольованої нейтраллю й у мережі з компенсацією ємнісного струму, при замиканні на землю практично не відбувається викривлення лінійних напруг.

5.1. Мережі з резистивним заземленням нейтралі при стійкім замиканні на землю й нормальному режимі роботи мережі

Необхідні співвідношення при стійкім замиканні на землю й у нормальному режимі для мережі з резистивним заземленням нейтралі можна одержати за схемою заміщення, наведеної на рис. 5.2.

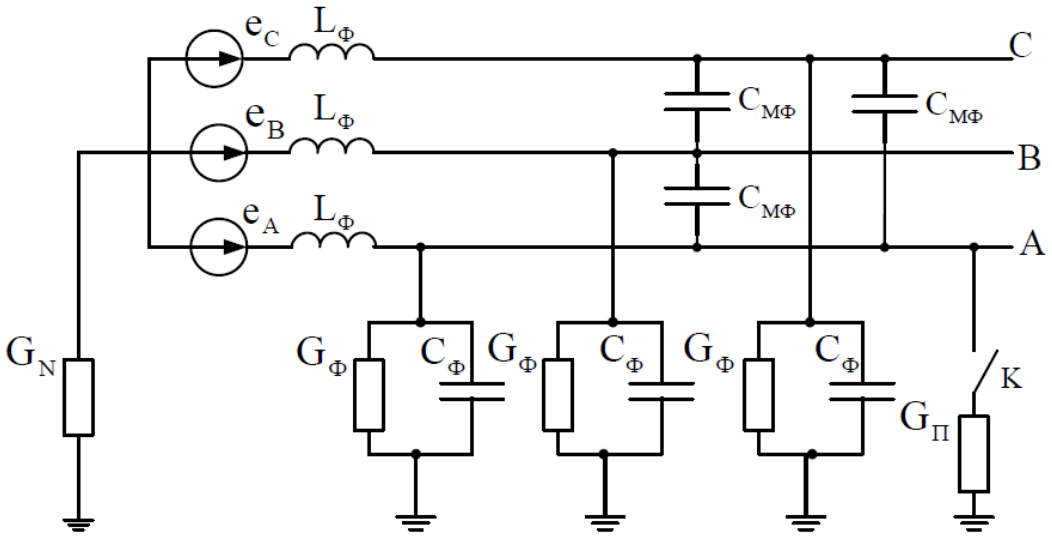


Рис. 5.2 - Схема заміщення мережі з резистивним заземленням нейтралі

Ця схема заміщення є часткам случаємо схеми, що використовується для розгляду мережі з компенсацією ємнісного струму, якщо

$$B_L = \frac{1}{\omega L} = 0, \quad G_L = G_N = \frac{1}{R_N}.$$

Очевидно, що й співвідношення, отримані для компенсованої мережі, будуть відповідати мережі з резистивним заземленням нейтралі при зазначених вище умовах.

Однак, на відміну від мережі з компенсацією ємнісних струмів у даному випадку можна обмежитися визначенням струмів тільки для робочій частоти, тому що складові вищих гармонік при резистивному заземленні нейтралі стосовно повного струму замикання значно менше, чим у компенсованій мережі стосовно остаточному струму. Таким чином, електричні величини, що характеризують режим мережі з резистивним заземленням нейтралі при стійкому замиканні на землю, визначаються наступними співвідношеннями: напруга на нейтралі

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A G_П}{3\underline{Y}_Ф + G_П + G_N}; \tag{5.1}$$

напруга на ушкодженій фазі

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A\left(3\underline{Y}_Ф + G_N\right)}{3\underline{Y}_Ф + G_П + G_N}; \tag{5.2}$$

струм у місці замикання

$$\dot{I}_З = \dot{U}_A \cdot G_П = \frac{\dot{E}_A\left(3\underline{Y}_Ф + G_N\right)G_П}{3\underline{Y}_Ф + G_П + G_N}; \tag{5.3}$$

напруги на неушкоджених фазах В и С

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_B\left(3\underline{Y}_Ф + G_N\right) - \dot{E}_A G_П}{3\underline{Y}_Ф + G_N + G_П}; \tag{5.4}$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_C\left(3\underline{Y}_Ф + G_N\right) - \dot{E}_A G_П}{3\underline{Y}_Ф + G_N + G_П}. \tag{5.5}$$

У формулах (5.1) – (5.5)

$\dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C = \dot{E}_Ф$ – діючі значення фазних Е.Р.С. робочої частоти ω;

$\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_Ф = G_Ф + j\omega C_Ф$ – повні провідності фаз відносно

землі;

$G_{П} = 1/R_{П}$ – провідність у місці замикання;

G_N – провідність заземлюючого резистора.

Представимо (5.3) у вигляді

$$\dot{I}_З = \frac{\dot{E}_A}{R_П + \dfrac{1}{3G_Ф + G_N + j3\omega C_Ф}}. \qquad (5.6)$$

Вираженню (5.6) відповідає схема заміщення нульовий послідовності, наведена на рис. 5.3.

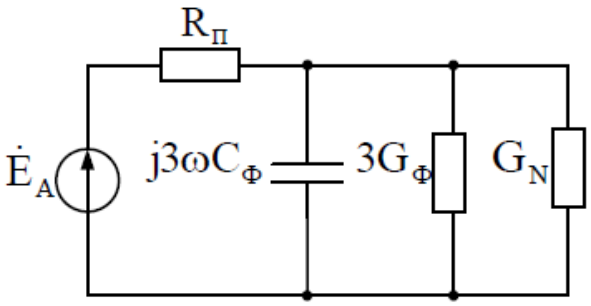


Рис. 5.3 - Схема заміщення нульової послідовності

Прийнявши, як і раніше в якості базисної сумарну ємнісну провідність фаз мережі щодо землі ($3\omega C_Ф$) перетворимо (5.6) у такий спосіб

$$\dot{I}_З = I_C \frac{1}{R_{П*} + \dfrac{1}{d + G_{N*} + j}}, \qquad (5.7)$$

де $R_{П*} = R_П 3\omega C_Ф$, $d = \dfrac{3G_Ф}{3\omega C_Ф}$, $G_{N*} = \dfrac{G_N}{3\omega C_Ф}$,

$\dot{I}_C = \dot{E}_A 3j\omega C_Ф$ – ємнісна складова струму замикання на землю

Прийнявши в (5.7) $R_{П*} = 0$ отримаємо

$$\dot{I}_З = \dot{I}_a + \dot{I}_{aN} + \dot{I}_C, \qquad (5.8)$$

де $\dot{I}_a = \dot{I}_C d$ – активна складова струму замикання, що обумовлена активною провідністю фаз мережі щодо землі.

$\dot{I}_{aN} = \dot{E}_Ф G_N = \dot{I}_C G_{N*}$ – активна складова струму замикання, обумовлена заземленням нейтралі через резистор.

Очевидно, що відносна провідність G_{N*} рівна також відношенню додаткового активного струму до ємнісного струму замикання яке позначимо $I_{aN*} = \frac{I_{aN}}{I_C}$.

Діючи також, як і при виводі співвідношень (4.20) і (4.22), отримаємо для абсолютних значень:

напруга на нейтралі

$$U_N = \frac{E_\Phi}{\sqrt{\left(dR_{П*} + G_{N*}R_{П*} + 1\right)^2 + R_{П*}^2}}; \qquad (5.9)$$

напруги на неушкоджених фазах

$$U_{C,B} = E_\Phi \sqrt{\left(0{,}5 + \frac{\left(dR_{П*} + G_{N*}R_{П*} + 1\right)}{\left(dR_{П*} + G_{N*}R_{П*} + 1\right)^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \pm \frac{R_{П*}}{\left(dR_{П*} + G_{N*}R_{П*} + 1\right)^2 + R_{П*}}\right)^2} \qquad (5.10)$$

В (5.10) знак «+» ставиться до фази випереджальної стосовно ушкодженої, а «-» до відстаючої.

На рис. 5.4 побудовані графіки напруг на нейтралі й непошкоджених фазах залежно від перехідного опору при різних значеннях G_N*.

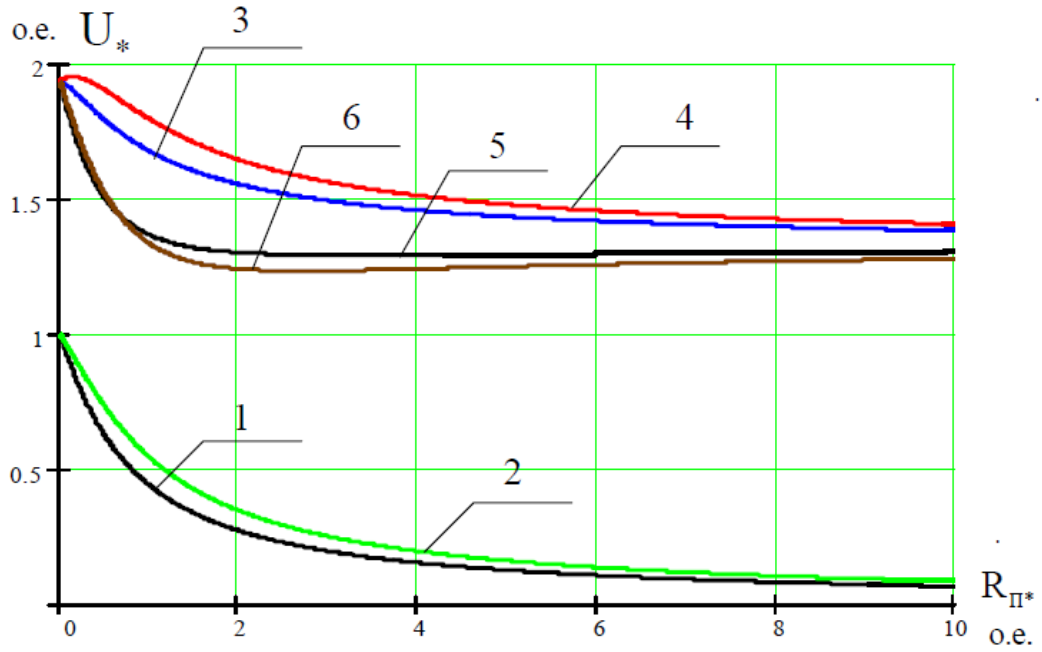


Рис. 5.4 - Графіки напруг залежно від перехідного опору:

1, 2 – напруга на нейтралі; 3,4 – напруга на фазі З; 5,6 – напруга на фазі В; 1, 3, 5 – побудовано при $G_{N*} = 1$; 2, 4, 6 – побудовано при $G_{N*} = 0{,}5$

Як і слід було сподіватися, при $R_{П*} = 0$ та при будь-якім значенні G_{N*}, опору прямій і зворотному послідовностей значно менше опору нульової послідовності. Також цілком зрозуміло й те, що при тих самих значеннях перехідного опору напруга нульової послідовності менше, чим у мережі з ізольованої нейтраллю й у мережі з компенсацією ємнісного струму.

Напруга зсуву нейтралі, викликане ємнісною несиметрією, при відсутності замикання визначається також як і в мережі із ізольованою нейтраллю (4.24) при $G_L = G_N$.

$$U_{Nсм} = E_Ф \frac{\alpha_C}{\sqrt{(d + G_{N*})^2 + 1}}. \qquad (5.11)$$

З (5.11) випливає, що при резистивному заземленні напруга зсуву нейтралі за інших рівних умов (при певної ємнісної несиметрії) тем менше, чим більше G_N.

5.2. Вплив резистивного заземлення нейтралі на перенапруги при повторних запалюваннях дуги

Перехідні процеси в мережі з резистивним заземленням нейтралі будемо розглядати за схемою заміщення, наведеної на рис. 5.2.

Заземлюючий резистор у принципі впливає на перехідний процес після загасання дуги. При розгляді перехідних процесів, викликуваних пробоєм ізоляції однієї з фаз, у мережі з компенсацією ємнісного струму було прийнято, що дугогасильний реактор не оказує на ці процеси практично ніякого впливу, тому що його опір при високих частотах перехідних процесів досить велике. При заземленні нейтралі через резистор відсутність такого впливу не очевидно.

Розглянемо спочатку вплив заземлюючого резистора на перехідні процеси зміни заряду ємностей неушкоджених фаз. При оцінці цього впливу зневажимо індуктивністю заземлюючого трансформатора, що свідомо дасть більший вплив, тому що згадані процеси носять високочастотний характер.

Наведені в темі 2 співвідношення показують, що перехідний процес у неушкоджених фазах однаковий і проходить синхронно. При цьому схема заміщення, що відображає цей процес представлена на рис. 5.5, де $U_{пр}$ – напруга, при якім запалюється дуга (напруга пробою).

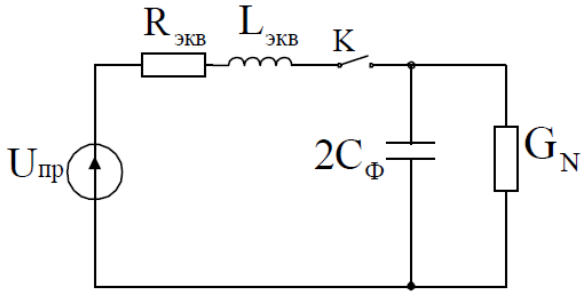


Рис. 5.5 - Схема заміщення контурів неушкоджених фаз для перехідного процесу при запалюванні дуги

Диференціальне рівняння, що описує вільну складову перехідного процесу в схемі (рис. 5.5), відносно напруги на ємності

$$\frac{d^2u_C}{dt^2}+\left(\frac{G_N}{2C_Ф}+\frac{R_{экв}}{L_{экв}}\right)\frac{du_C}{dt}+\left(\frac{1}{2L_{экв}C_Ф}+\frac{G_NR_{экв}}{2L_{экв}C_Ф}\right)u_C=0. \qquad (5.12)$$

Коефіцієнти диференціального рівняння (5.12)

$д_1=\left(\frac{G_N}{4C_Ф}+\frac{R_{экв}}{2L_{экв}}\right)$, $щ_{р1}^2=\left(\frac{1}{2L_{экв}C_Ф}+\frac{G_NR_{экв}}{2L_{экв}C_Ф}\right)$ являються відповідно коефіцієнтом загасання й квадратом резонансної частоти еквівалентного контуру перехідного ємнісного струму, які з обліком того, що $G_N=G_{N*}3щC_Ф$ представимо в наступному виді

$$д_1=д_1^{/}+\frac{3}{4}щG_{N*}, \qquad (5.13)$$

$$щ_{р1}^2=щ_{р1}^{/2}+3д_1^{/}щG_{N*}, \qquad (5.14)$$

де $д_1^{/}=\frac{R_{экв}}{2L_{экв}}$, $щ_{р1}^{/2}=\frac{1}{2L_{экв}C_Ф}$ – відповідно коефіцієнт загасання і резонансна частота контуру перехідного ємнісного струму без обліку впливу заземлюючого резистора (у мережі з ізольованої нейтраллю).

Таким чином, у мережі з резистивним заземленням нейтралі коефіцієнт загасання перехідного ємнісного струму замикання визначається по (5.13), а частота вільних коливань рівна

$$щ_1 = \sqrt{щ_{р1}^2 - д_1^2}\ . \qquad (5.15)$$

Як видне з (5.13), (5.14), ступінь впливу провідності заземлюючого резистора на значення $д_1$, $щ_{р1}$ залежить від їхніх вихідних значень $G_{N*} = 0$. Для кількісної оцінки цього впливу приймемо конкретні значення $д_1 = 420,\ щ_{р1} = 12566$ 1/с (2000 Гц) у відповідності до прийнятих при розрахунку перенапруг значень $k_{д1} = 0{,}1$ (3.13).

Залежності $д_1$, $щ_{р1}$ от G_{N*} наведені на рисунку 5.6.

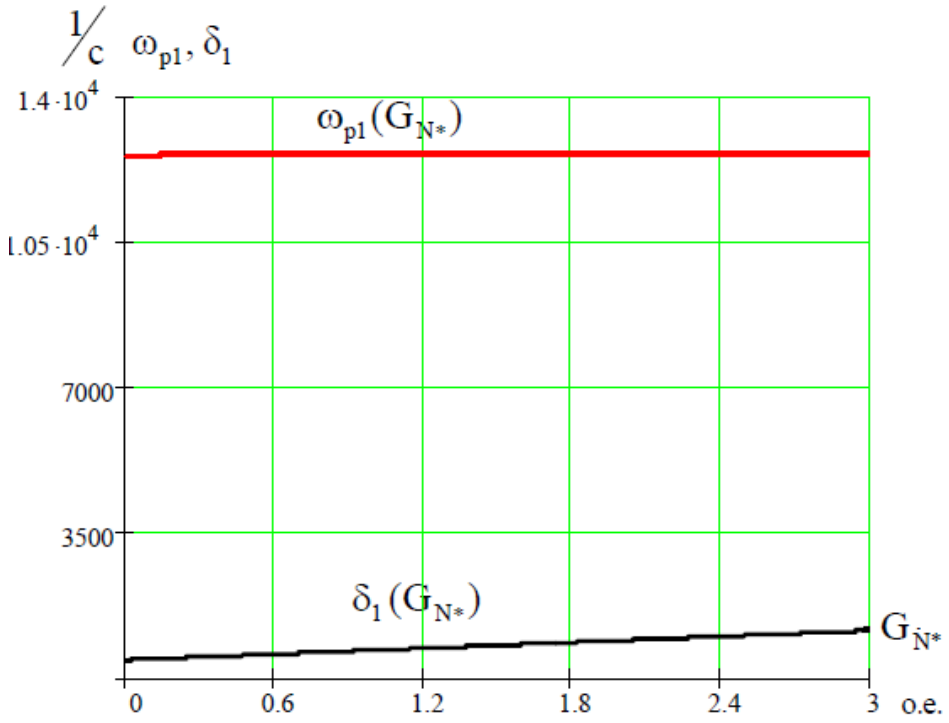


Рис. 5.6 -Залежності коефіцієнта загасання й резонансної частоти від провідності заземлюючого резистора

Як видно, навіть при порівняно більших значеннях G_{N*} перехідний процес, викликаний запалюванням дуги, залишається коливальним слабо загасаючим. Тому й у мережі з резистивним заземленням нейтралі загасання дуги може відбуватися при проходженні через нуль сумарного струму

замикання, тобто практично через ціле число напівперіодів складовій із частотою ω_1 або при проходженні через нуль примушеної складової струму.

Тому що залишкова напруга на нейтралі, обумовлене цими зарядами, є однією з основних причин виникнення більших перенапруг, те визначимо G_{N*}, при якім виконується умова практично повного стікання надлишкових зарядів за половину періоду промислової частоти після загасання дуги. Схема заміщення нульової послідовності для цієї стадії процесу наведена на рис. 5.7.

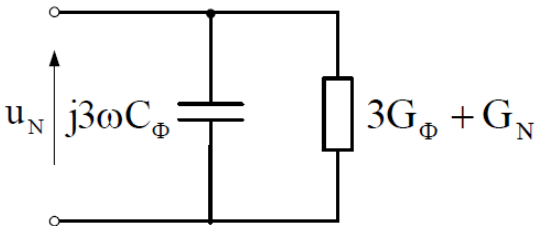


Рис. 5.7 - Схема заміщення мережі з резистивним заземленням нейтралі після загасання дуги

Напруга на нейтралі після загасання дуги змінюється по закону

$$u_N = u_{N0} e^{-t/\tau_N}, \qquad (5.16)$$

де u_{N0} – напруга на нейтралі в момент загасання дуги,

$\tau_N = \frac{3C_Ф}{3G_Ф + G_N}$ – постійна часу процесу стікання надлишкових зарядів.

Помноживши й розділивши вираження для τ_N на промислову частоту ω, приведемо його до виду

$$\tau_N = \frac{1}{(d + G_{N*})\omega}. \qquad (5.17)$$

Тому що перехідний процес по (5.16) практично закінчується за час, рівне $3\tau_N$, шукане значення G_{N*} знайдемо з умови

$$3\tau_N = \frac{T}{2}, \qquad (5.18)$$

де $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – період напруги промислової частоти.

Підставивши в (5.17) вираження (5.18) одержимо

$$G_{N*}=\frac{3}{p}-d.$$

Тому що $d<<\frac{3}{p}$, то $G_{N*}\approx\frac{3}{p}=0,955$.

Таким чином, позитивний вплив резистивного заземлення, що проявляється в усуненні ефекту нагромадження надлишкових зарядів при повторних запалюваннях дуги, практично повністю реалізується, якщо додаткова активна складова струму замикання приблизно дорівнює ємнісної складовій.

Тому що вартість заземлюючого резистора при інших рівних умовах зменшується при зменшенні струму, на який він розраховується, тоді доцільно розглянути наскільки зберігається ефект зниження перенапруг, якщо прийняти $G_{N*}<\frac{3}{p}$.

Тому що в прийнятому діапазоні значень G_{N*} (приблизно від 0 до 1) перехідний струм у місці замикання може залишатися коливальним з порівняно слабким загасанням, те й у мережі з резистивним заземленням нейтралі формування перенапруг може відбуватися по кожній з відомих теорій (тема 3.3).

Проаналізуємо, як змінюються розрахункові перенапруги по теорії Петерсена при зміні G_{N*}. Для цього, мабуть, випливає вираження для напруги на нейтралі, що формується при наступному циклі запалювання й загасання дуги, ввести множник, враховуючий його загасання за половину періоду промислової частоти. У результаті одержимо

$$u_{Nn}=\frac{2}{3}u_{BM(n-1)}e^{-p(d+G_{N*})}. \qquad (5.19)$$

При цьому максимальна розрахункова перенапруга буде дорівнювати

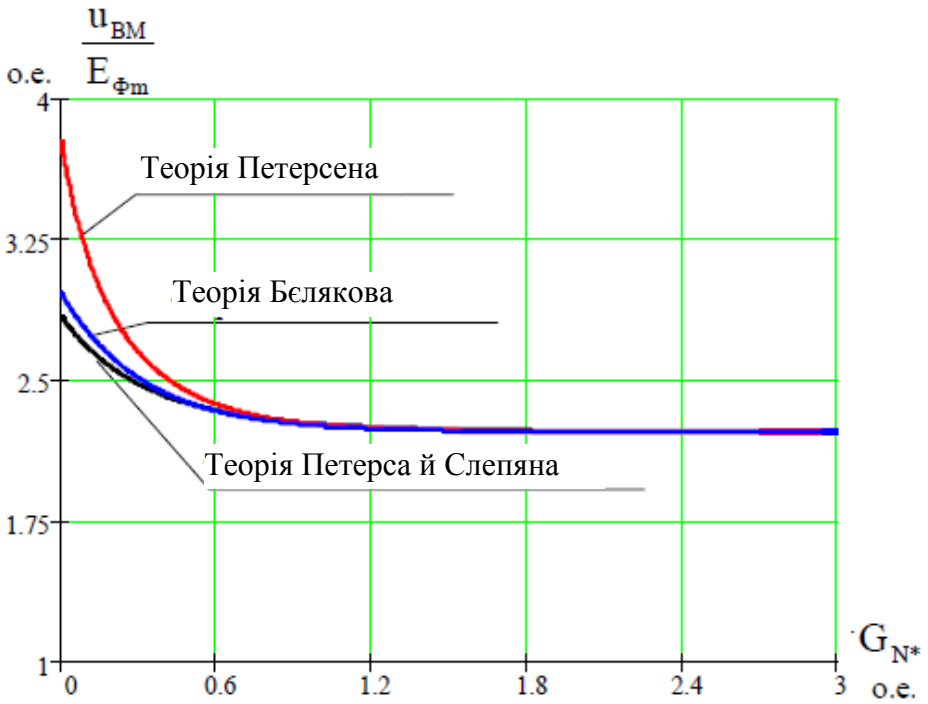
$$u_{BMn}=E_{Фm}\frac{1,5+(1-k_C)(1-k_{δ1})}{1-\frac{2}{3}(1-k_C)(1-k_{δ1})e^{-π(d+G_{N*})}}. \qquad (5.20)$$

Залежність перенапруг від G_{N*} по (5.20) наведена на рис. 5.8. При розрахунках перенапруг було враховано деяке збільшення загасання напруги із частотою ω_1 відповідно до (5.13), тому прийняте конкретне значення $\delta_1 = 420\ (1/c)$.

Вплив заземлення через резистор на формування перенапруг по теорії Петерса й Слепяна обумовлене не тільки загасанням напруги на нейтралі до моменту чергового запалювання дуги, але й тим, що момент переходу примушеного струму замикання через нуль зрушується щодо максимуму напруги на нейтралі. Тому в момент загасання дуги початкове значення напруги, що залишається, на нейтралі менше амплітуди фазної напруги й, отже, час від моменту загасання дуги до досягнення найближчого максиму напруги на ушкодженій фазі менше половини періоду (рис. 5.9).

При загасанні дуги в момент t_2, коли повністю загасає періхідний процес, викликаний попереднім запалюванням дуги, напруга на нейтралі (рис. 5.9) дорівнює

$$u_N = -E_{\Phi m} \sin(2\pi - \beta_3) = E_{\Phi m} \sin(\beta_3). \qquad (5.21)$$



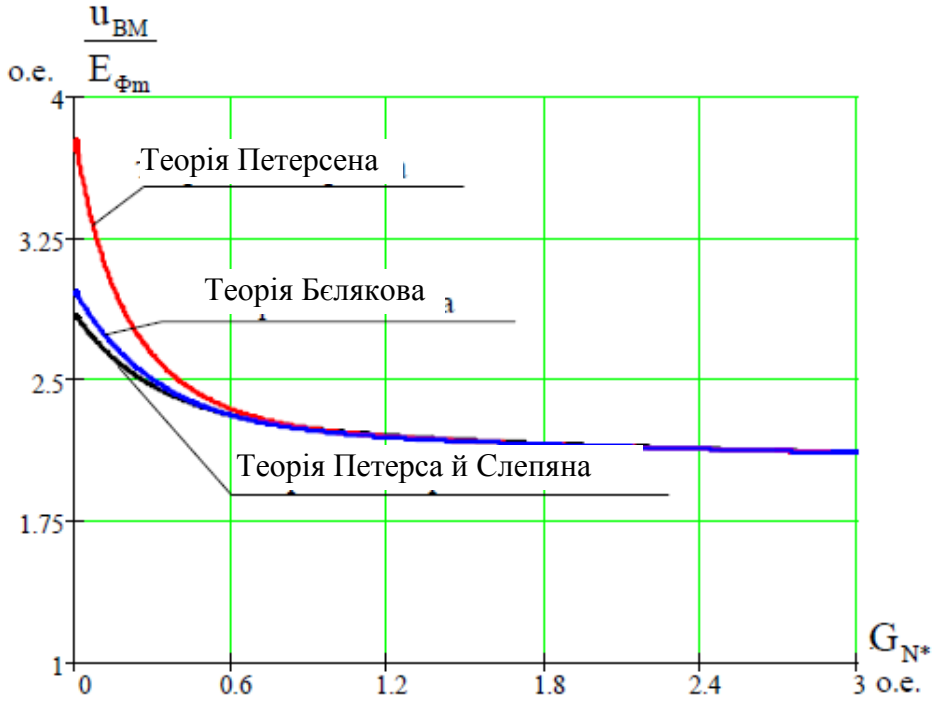


Рис. 5.8 - Залежності перенапруг від провідності заземлюючого резистора: а) – без обліку впливу резистора на коефіцієнт загасання; б) – з урахуванням впливу резистора на коефіцієнт загасання

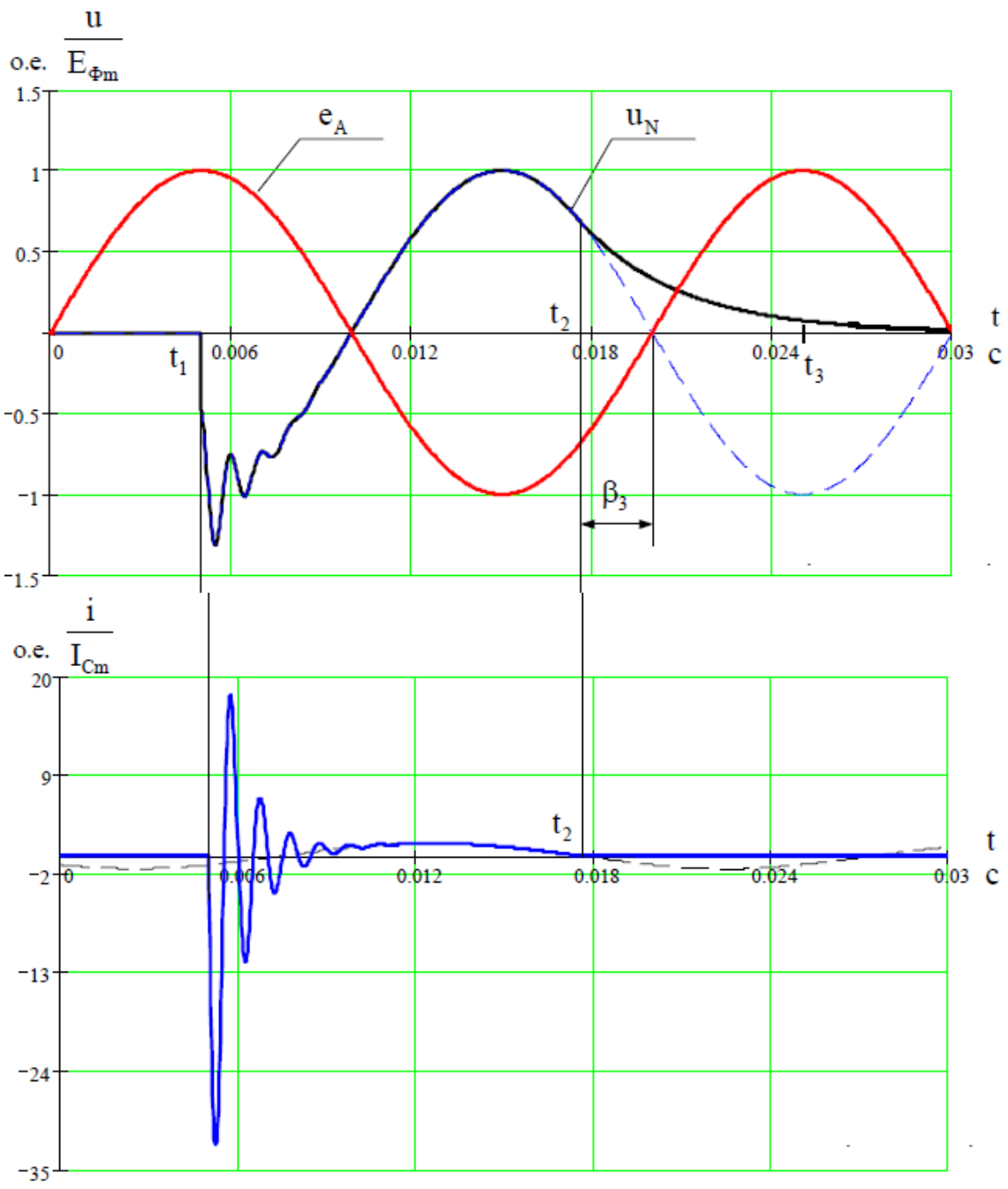


Рис. 5.9 - Вплив заземлення через резистор на перенапруги по теорії Петерса й Слепяна

Кут β_3 визначається співвідношенням між ємнісної й активною складовою струму замикання, тобто

$$\beta_3 = \operatorname{arctg}\frac{1}{d + G_{N*}}. \qquad (5.22)$$

Відрізок часу від моменту загасання дуги (момент t_2) до моменту досягнення максимуму напруги на ушкодженій фазі (момент рівний t_3)

дорівнює

$$t_3 - t_2 = \frac{\frac{\pi}{2} + \beta_3}{\omega}. \qquad (5.23)$$

Напруга на ушкодженій фазі в момент повторного запалювання дуги (момент t_3)

$$u_A(t_3) = E_{\Phi m} + E_{\Phi m} \sin(\beta_3) e^{-\left(\frac{\pi}{2}+\beta_3\right)(d+G_{N*})}. \qquad (5.24)$$

У момент t_3 примушена напруга на неушкоджених фазах 1,5ЕФm. Зневажаючи, як і раніше, його зміною за половину періоду перехідного ємнісного струму одержимо

$$u_{BM} = u_{CM} = 1,5E_{\Phi m} + u_A(t_3)(1-k_C)(1-k_{\delta 1}). \qquad (5.25)$$

Для визначення впливу резистивного заземлення нейтралі на формування перенапруг по теорії Бєлякова у формулі (3.50) також врахуємо загасання напруги на нейтралі за половину періоду промислової частоти, що дає

$$u_{BM} = 1,5E_{\Phi m} + (1,2E_{\Phi m} e^{-\pi(d+G_{N*})} + E_{\Phi m})(1-k_C)(1-k_{\delta 1}). \qquad (5.26)$$

Як випливає із кривих, представлених на рис. 5.8, ефект зниження перенапруг суттєво проявляється й при значенні $G_{N*} = 0,5$. Ця обставина є дуже важливою, тому що дозволяє одержати істотний ефект при меншій потужності й, отже, при меншій вартості заземляючого резистора.

ТЕМА 6. МЕРЕЖІ З КОМБІНОВАНИМ ЗЕЗЕМЛЕННЯМ НЕЙТРАЛІ

В останні роки в ряді робіт запропоновано використовувати заземлення нейтралі через паралельно з'єднані дугогасильний реактор і резистор, опір якого підбирається певним чином. Такий режим заземлення нейтралі називають комбінованим.

Очевидно, що включення паралельне дугогасящему реактору додаткового резистора приводить фактично тільки до збільшення коефіцієнта демпфірування d. Тому для аналізу мережі з комбінованим заземленням нейтралі придатні всі співвідношення, отриманий для мережі з компенсацією ємнісного струму.

Комбіноване заземлення нейтралі насамперед доцільно застосовувати в тих випадках, коли за якимись причинами неможливо реалізувати режим компенсації ємнісного струму з малим розладом, коли повністю проявляються позитивні властивості компенсації ємнісного струму відносно всіх факторів, що впливають на ефективність компенсації. Характерним прикладом випадку, коли доцільно застосування комбінованого заземлення нейтралі, є повітряна мережа з порівняно більшим ємнісним струмом, розташована в районах вічної мерзлоти або скельних ґрунтів, через що складно виконати заземлюючі пристрої підстанційного устаткування й опори з таким опором, при якім забезпечуються допустима напруги дотику й кроку при замиканні на землю.

Перешкодою для застосування звичайної компенсації ємнісного струму для зниження струму замикання на землю й зниження, таким чином, напруги дотику й кроку є значна ємнісна несиметрія фаз мережі, що, як правило, має місце в повітряних мережах. Це може бути причиною появи неприпустимого зсуву нейтралі в нормальному режимі при малих розладах компенсації.

Принципово можлива підтримка, у тому числі й автоматична, такої расстройки компенсації, при якій напруга зміщення нейтралі не буде перевищувати припустиме значення $0{,}15U_{ф\ ном}$. При цьому може знадобитися

розлад компенсації 20% і навіть більш.

При таких розладах ефективність компенсації ємнісного струму знижується. Сполучення суперечливих вимог зниження струму замикання на землю й обмеження напруги зсуву нейтралі в нормальному режимі може бути досягнута шляхом включення паралельно дугогасильному реактору резистора.

Як випливає із (4.49) і рис. 4.14, таке підключення приводить до зниження перенапруг у режимах, коли має місце значний розлад компенсації.

Ряд фахівців вважає за доцільне застосування комбінованого заземлення нейтралі у всіх випадках, у тому числі й у свідомо симетричні по фазах кабельних мережах, на тій підставі, що при цьому досягається зниження дугових перенапруг без застосування дорогих технічних засобів у вигляді плавно регульованих дугогасильних реакторів із пристроєм для їхнього автоматичного регулювання.

Таким чином, вибір опору резистора, що підключається паралельно дугогасильному реактору, у загальному випадку може вибиратися із двох умов:

1. Обмеження дугових перенапруг при максимально можливих в експлуатації розладу компенсації.

2. Обмеження напруги зсуву нейтралі при максимально можливому в експлуатації коефіцієнті ємнісної несиметрії мережі й при точнім настроюванні компенсації.

Далі визначимо сумарне значення коефіцієнта демпфірування, при якому виключається причина виникнення дугових перенапруг, обумовлених по (4.49). Для цього необхідно, щоб за час $t_м$ по (4.45) напруга на нейтралі після загасання дуги практично повністю загасало. Це буде мати місце, якщо постійна часу загасання амплітуди вільних коливань на нейтралі $\tau_3 = \frac{2}{d\omega}$ буде задовольняти умові

$$3\tau_3 = t_M . \qquad (6.1)$$

При виконанні умови (6.1), як випливає із (4.46), (4.47), напруга на ушкодженій фазі після чергового обриву дуги практично не може перевищувати амплітуду фазної напруги, тому що по перебігу часу $t_м \ e^{-3\tau_з} \approx 0,05$. Тому й перенапруга не може перевищити значення, яке має місце при першому пробої ізоляції в момент, коли напруга на ушкодженій фазі рівно $E_{фm}$. При початкових умовах побудови кривих розрахункових перенапруг, наведених на рис. 4.14, воно рівно 2,22 $E_{фm}$.

Таким чином, необхідне сумарне значення d залежно від розладу компенсації можна визначити із системи рівнянь, отриманих з умов (4.44) і (6.1)

$$\begin{gathered} t_M \omega \left[1 - \sqrt{(1-\upsilon) - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right] = \pm\pi, \\ \frac{6}{d\omega} = t_M. \end{gathered} \tag{6.2}$$

Результати розрахунків по (6.2) наведені на рис. 6.1. Як видне, эфект зниження дугових перенапруг при повторних запалюваннях дуги практично повністю реалізується, якщо виконується умова

$$d \approx |\upsilon|. \tag{6.3}$$

Також як і в мережі з резистивним заземленням нейтралі можна очікувати, що досить сильно ефект зниження перенапруги буде

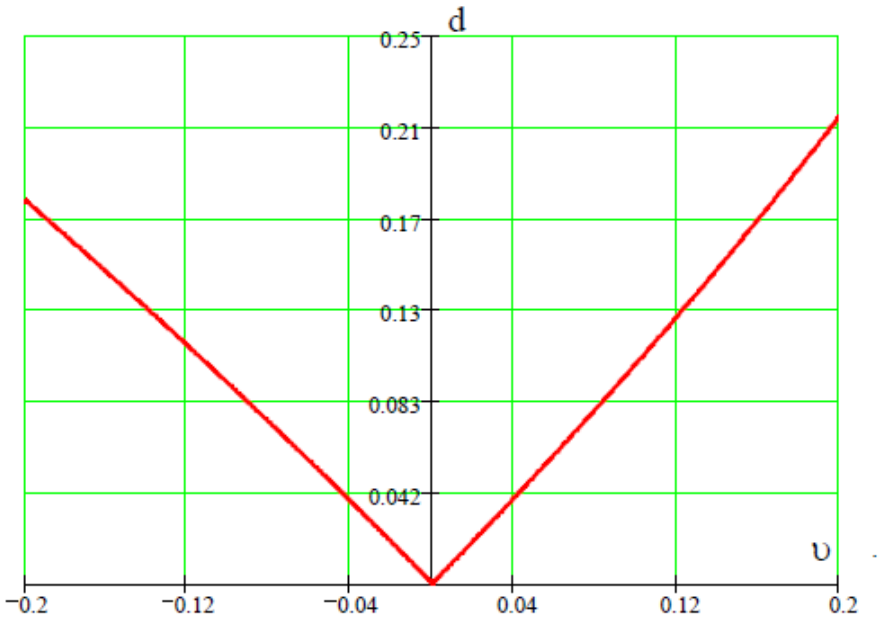


Рис. 6.1 - Значення коефіцієнта демпфірування, при якому повністю проявляється ефект зниження перенапруги при комбінованому заземленні

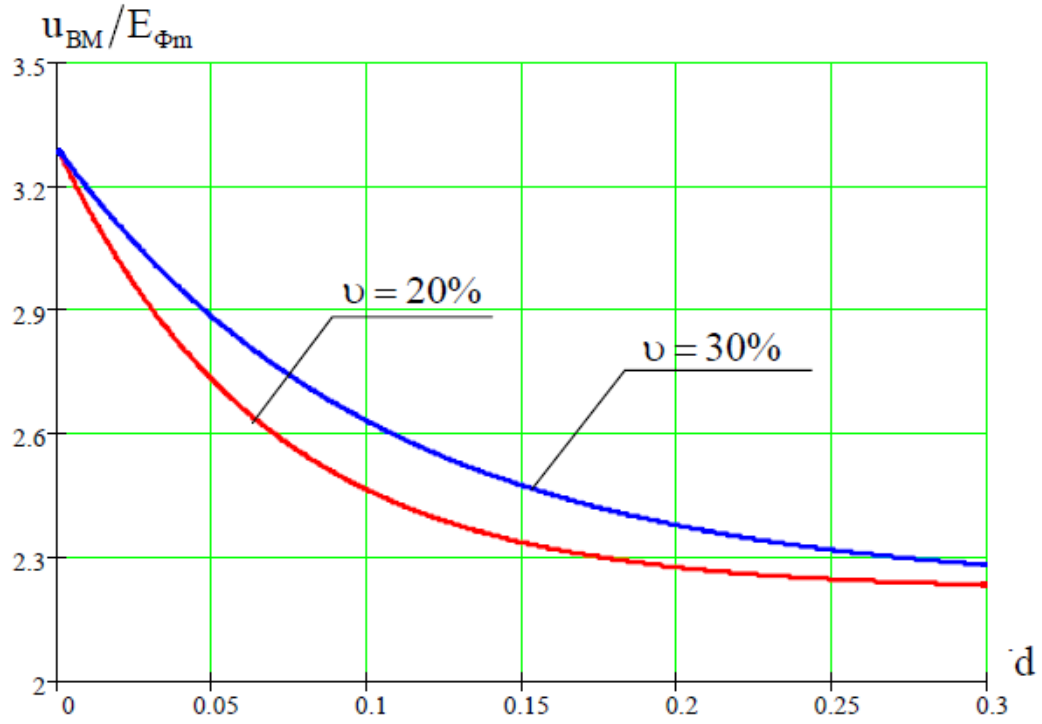


Рис. 6.2 - Залежність перенапруг від коефіцієнта демпфірування

В мережі з комбінованим заземленням нейтралі проявлятися й при $d < |\upsilon|$.

Даний факт підтверджується кривими залежностей розрахункових перенапруг (рис. 6.2), отриманих при зміні d при декількох значеннях υ по (4.49).

ТЕМА 7. ПОВНА КОМПЕНСАЦІЯ СТРУМУ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

Повна компенсація однофазного струму замикання полягає в тому, що компенсується не тільки ємнісна складова струму замикання, але й активна складова. Компенсація активної складової запропонована досить давно й для її здійснення було розроблено кілька різних схем. При компенсації активної складової струму замикання крім властиво зниження даної складової, в електричній мережі з'являється ще ряд специфічних ефектів.

У нашій країні ідея повної компенсації ємнісного струму розвивається й реалізується у вигляді конкретних технічних розробок. Компенсація активної складової струму замикання в порівнянні з компенсацією ємнісної складової має ту істотну відмінність, що для цього обов'язково необхідно використовувати спеціально організовану підживлення контуру нульової послідовності від якого-небудь джерела із частотою, рівній робочій частоті мережі.

При повній компенсації активної складової струму замикання активна потужність, споживана від цього джерела, дорівнює втратам активної потужності в контурі нульової послідовності. У залежності від способу підключення допоміжного джерела він може бути джерелом напруги або джерелом струму.

Розглянемо основні особливості компенсації активної складової на прикладі використання джерела струму. Для цього будемо використовувати схему заміщення нульової послідовності мережі при замиканні на землю (рис. 4.2). Ця схема з додаванням джерела додаткового струму представлена на рис. 7.1, де

$I_З$ – струм у місці замикання, який мав би місце без джерела додаткового струму;

$I_{ДОД}$ – струм додаткового джерела;

$I_З$ – результуючий струм у місці замикання.

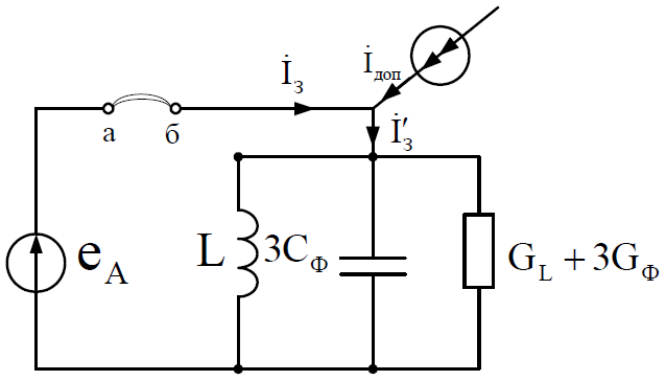


Рис. 7.1 - Схема заміщення нульової послідовності мережі із джерелом для повної компенсації струму замикання

Місце замикання показане крапками «а» і «б». Замикання може бути як стійким, так і дуговим. Визначимо далі модуль і фазу струму додаткового джерела, при яких струм у місці замикання при стійкім замиканні буде дорівнює нулю при будь-яких довільних значеннях υ і d, оскільки в загальному випадку компенсація ємнісної складової за рахунок дугогасящего реактора може бути неповної.

По першому закону Кірхгофа (рис. 7.1)

$$\dot{I}_З = \dot{I}'_З - \dot{I}_{ДОД}.$$

Ухвалюючи умову $I_З = 0$ і виражаючи струм $\dot{I}'_З$ через параметри схеми заміщення по співвідношеннях (4.13), (4.17) і (4.18), одержуємо вираження для визначення необхідного струму $\dot{I}_{ДОД}$.

$$I_{ДОД} = E_Ф\ 3\omega C Ф\ (d + j\upsilon). \qquad (7.1)$$

Природно, що за допомогою додаткового джерела можна компенсувати залишковий струм у місці замикання, обумовлений як неточним настроюванням дугогасильного реактора, так і активної провідності. Причому активна складова струму замикання компенсується відповідно до активної складовій додаткового струму

$$I_{ДОД\ а} = E_Ф\ 3\omega C Ф d,$$

а реактивна – уявної складовій

$$I_{ДОД\ р} = E_Ф\ 3\omega C Ф \upsilon.$$

Складові $\dot{I}_{\text{ДОД}}$ а, $I_{\text{ДОД}}$ р, при практичній реалізації повної компенсації струму замикання, можуть бути виділені апаратними засобами й регулюватися незалежно друг від друга.

За інших рівних умов переважно так виконати систему повної компенсації струму замикання, щоб ємнісна складова повністю компенсувалася дугогасильним реактором. Тоді $\upsilon = 0$, $I_{\text{ДОД}}$ р = 0 і тому необхідна повна потужність джерела додаткового струму буде мінімальною.

Далі покажемо, що при наявності джерела, що створює струм по умові (7.1), крім ефекту повної компенсації першої гармоніки струму замикання, електрична мережа здобуває важливу властивість, яка полягає в тому, що після обриву дуги напруга на пошкодженої фазі щодо землі залишається практично рівним нулю до тих пор поки подається струм $\dot{I}_{\text{ДОД}}$.

Після обриву дуги напруга на нейтралі мережі визначається падінням напруги на еквівалентному опорі контуру нульовий послідовності від струму $I_{\text{ДОД}}$. Використовуючи співвідношення, отримані в темі 4, і схему заміщення по рис. 7.1, неважко показати, що ця напруга дорівнює

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{I}_{\text{доп}}}{3\omega C_{\Phi}(d + j\upsilon)}.$$

При виконанні умови (7.1) $\dot{U}_N = \dot{E}_{\Phi}$.

Як видне зі схеми заміщення (рис. 7.1) напруга на дуговому проміжку, а отже й на ушкодженій фазі, у вихідній трифазній схемі повністю компенсується штучно створеним напругою на нейтралі. У такий спосіб створюється ефект ідеальної компенсованої мережі, коли $d = 0$ і $\upsilon = 0$. При цьому частота вільних коливань напруги на нейтралі точно дорівнює частоті джерела живлення мережі, амплітуда даних коливань не загасає. У цьому випадку, теоретично, напруга на ушкодженій фазі буде рівним нулю протягом необмеженого часу.

При повній компенсації з використанням додаткового джерела через деякий час після замикання робиться пробне зняття додаткового струму. Якщо до цього моменту електрична міцність дугового проміжку відновилася,

то відбувається затухання напруги на нейтралі відповідно до природних значень υ і d. Напруга на ушкодженій фазі відновлюється, як при звичайній компенсації ємнісного струму замикання.

Додаткове підживлення струму замикання забезпечується за рахунок створення штучної й керованої несиметрії провідностей фаз мережі.

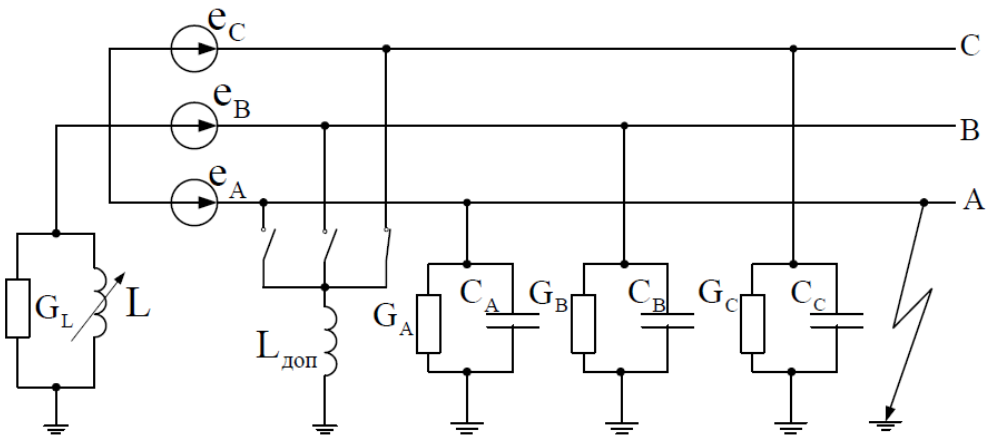


Рис. 7.2 - Схема заміщення мережі з повною компенсацією струму замикання шляхом створення керованої несиметрії провідностей фаз мережі

МОДУЛЬ 2 ПЕРЕНАПРУГИ Й ЗАХИСТ ВІД НИХ

ТЕМА 8. ПЕРЕНАПРУГИ Й ЗАХИСТ ВІД НИХ

8.1. Класифікація перенапруг

Перенапруга – усяке підвищення напруги в електричній мережі більше максимальної робочої $U_{\text{р.макс}} = U_H + (0{,}2 \div 0{,}05)\cdot U_H$, залежно від класу напруги.

При перенапругах створюються тяжкі умови для роботи ізоляції, тому що вони можуть у багато разів перевищувати $U_{\text{р.макс}}$. Перенапруги підрозділяються:

1) на зовнішні (грозові);

2) внутрішні (перехідні процеси в електричних мережах).

На рис. 8.1 наведена класифікація перенапруг.

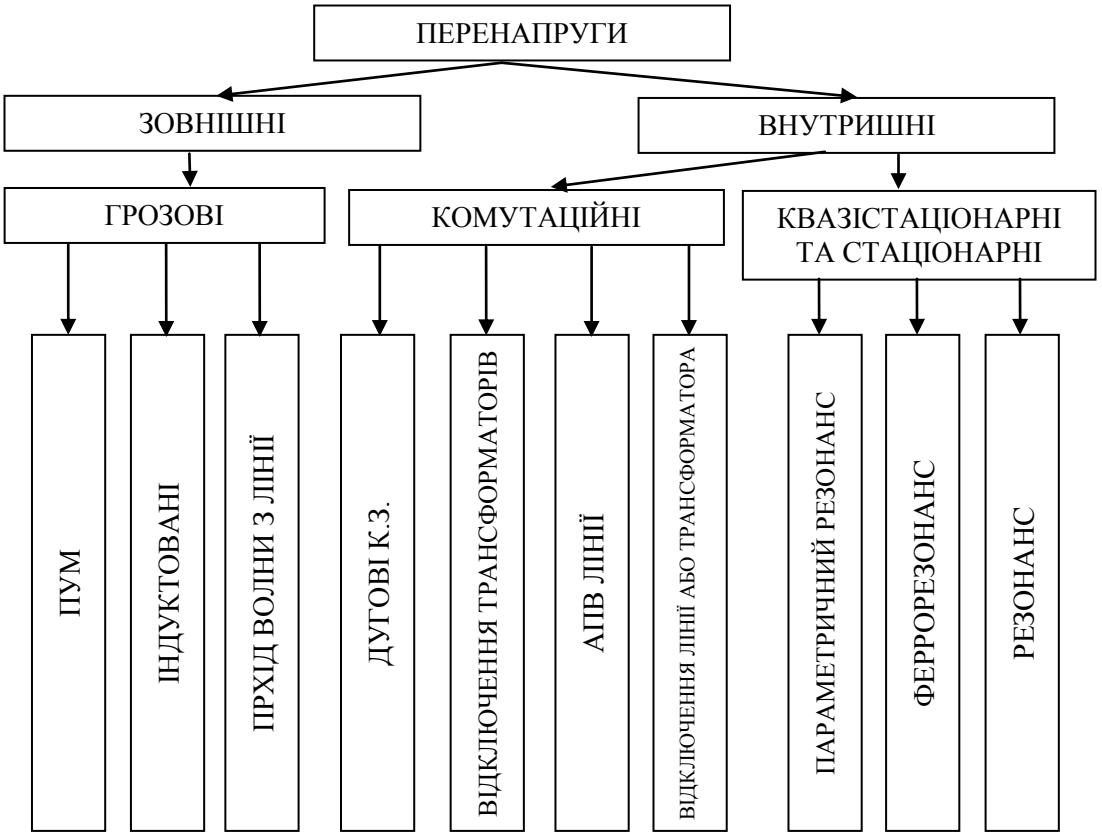


Рис. 8.1 - Класифікація перенапруг

Необхідно знати наступні характеристики перенапруг:

1. Максимальне значення амплітуди напруги при перенапрузі $U_{\text{макс}}$ або кратність перенапруг

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{р.макс}}}$$

2. Тривалість впливу перенапруги.

3. Форму кривої перенапруг (аперіодична, коливальна, високочастотна й ін.).

4. Широту охвату елементів електричному кола.

Усі перераховані характеристики мають стохастичну природу й мають значний статистичний розкид, який обов'язково враховується при розрахунках. Для ізоляції високовольтних пристроїв низьких класів напруги ($U \leq 220$ кВ) найнебезпечнішими є грозові перенапруги. Їхня ізоляція витримує комутаційні перенапруги будь-якої кратності.

Для ізоляції високовольтних пристроїв високих і надвисоких класів напруги ($U > 330$ кВ) найнебезпечнішими є комутаційні перенапруги.

Тому на низьких класах напруги обмежують спеціальними пристроями тільки грозові перенапруги, а на високих класах примусово обмежують і внутрішні перенапруги.

8.2. Внутрішні перенапруги

Найбільш різноманітні внутрішні перенапруги. Причини виникнення внутрішніх перенапруг дуже різноманітні (відключення лінії електропередач, трансформатора й інші перемикання; обриви фаз; КЗ, перекриття й пробій ізоляторів).

Внутрішні перенапруги викликаються коливаннями енергії, запасеної в елементах мережі, або при зміні вступники енергії від джерел енергії (генератори при зміні первісних параметрів).

Елементи електричної мережі: джерела енергії; накопичувачі енергії (конденсатори, котушки індуктивності); поглиначі енергії (активні опори, корона, провідність ізоляції).

Внутрішні перенапруги діляться на комутаційні, квазістаціонарні (, що встановилися), стаціонарні.

Умовний розвиток перенапруги графічно презентовано на рис. 8.2.

I стадія – перехідний процес (комутаційні перенапруги). Триває кілька періодів.

II стадія – стан, що умовно встановився (квазістаціонарна). Перехідний процес закінчився, але параметри ланцюга інші, тому встановилася висока напруга, а регулятори напруги на генераторах ще не встигнули спрацювати.

III стадія – робота регуляторів напруги в генераторів. Зниження напруги до нової робочої напруги, що встановилася.

Збільшення довжини й класу напруги лінії приводить до збільшення енергії в елементах мережі й, як наслідок, до збільшення кратності перенапруг. У зв'язку із цим для ліній класу U >330 кВ здійснюється примусове обмеження перенапруг до рівнів:

330 кВ – $K_{\text{п}} = 2{,}7$;
500 кВ – $K_{\text{п}} = 2{,}5$;
750 кВ – $K_{\text{п}} = 2{,}2$;
1150 кВ – $K_{\text{п}} = 1{,}8$.

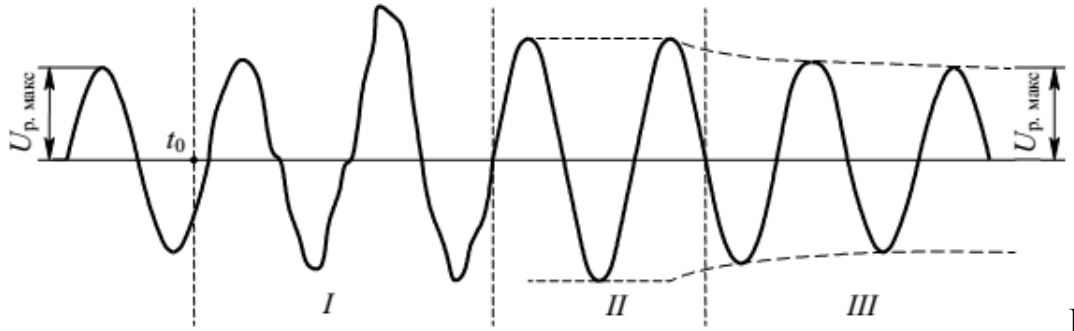


Рис. 8.2 - Вид напруги мережі з появою внутрішніх перенапруг: t_0 – момент комутації

Обмеження перенапруг здійснюється захисними розрядниками (РЗ), трубчастими розрядниками (РТ), вентильними розрядниками (РВ), нелінійними обмежниками перенапруг (ОПН) і схемними розв'язками (реактори, конденсатори, опори активні й ін.).

8.3. Грозозахист повітряних ліній електропередач і підстанцій

Основною кількісною характеристикою розряду блискавки є амплітуда струму блискавки. Повітряні лінії електропередач (ВЛ) у районах із середньою тривалістю грозової діяльності (20-30 годин у рік) дивуються розрядами блискавки 15-20 раз у рік на 100 км довжини. Струми блискавки змінюються в широких межах – від одиниць до сотень кілоампер. Середній розрахунковий струм блискавки становить 15 кА. При розряді блискавки в землю можуть дивуватися різні об'єкти, зокрема, повітряні лінії електропередачі, підстанції, станції. Протікання струму блискавки через об'єкт викликає виникнення хвилі напруги блискавки, яка може пробити й зруйнувати ізоляцію електротехнічних пристроїв. При розрахунках імпульсної електричної міцності користуються стандартною хвилею напруги.

8.3.1. Захист від прямих ударів блискавки

Для захисту об'єктів від поразки блискавкою використовуються блискавковідводи. Залежно від об'єкта, що захищається, застосовують стрижневі (підстанції) або тросові (ВЛ) блискавковідводи. Необхідною умовою ефективної роботи блискавковідводів є їхнє гарне заземлення.

Найбільші грозові перенапруги виникають при прямому ударі блискавки (ПУМ) у лінію або підстанцію. У місці удару виникає короткочасне (імпульсне) напруга в мільйони вольтів, тобто вище імпульсної електричної міцності ізоляції електропередач і електроустаткування. Для забезпечення надійної роботи електричної мережі необхідно здійснити її ефективний і економічний грозозахист.

Щоб бути захищеним від ПУМ, об'єкт повинен повністю перебувати усередині простору, який являє собою зона захисту блискавковідводу.

Зоною захисту блискавковідводів називається простір навколо блискавковідводу, влучення в яке розрядів блискавки малоймовірно.

8.3.2. Зона захисту стрижневого блискавковідводу

Поверхню, що обмежує зону захисту стрижневого блискавковідводу, може бути представлена ламаною лінією (рис. 8.3).

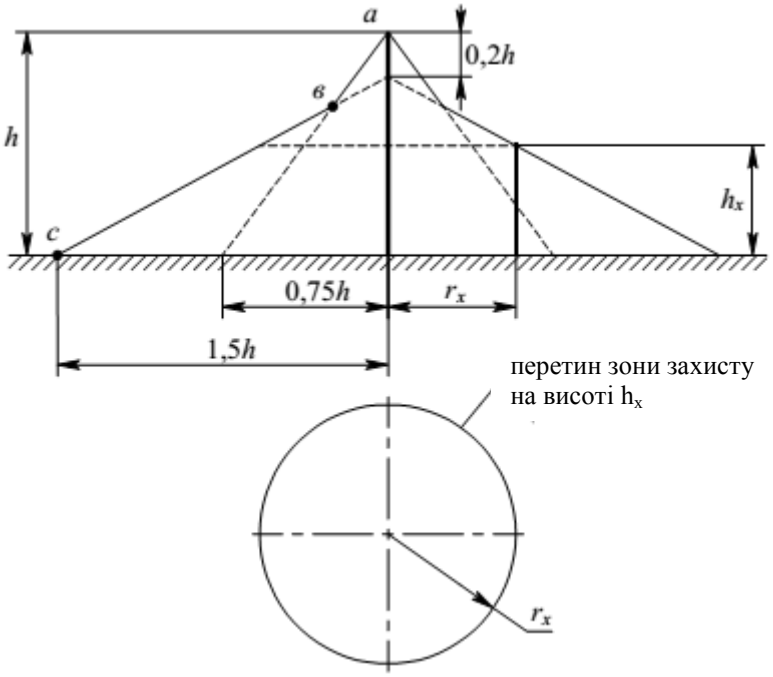


Рис. 8.3 - Побудова зони захисту стрижневого блискавковідводу

Відрізок *ав*– частина прямої, що з'єднує вершину блискавковідводу із крапкою поверхні землі, вилученої на 0,75*h* від осі блискавковідводу. Відрізок *вс*– частина прямої, що з'єднує точку блискавковідводу на висоті 0,8*h* із крапкою поверхні землі, вилученої на 1,5*h*. Точка *в* перебуває на висоті 2/3*h*. Радіус захисту на висоті h_x<2/3*h*

$$r_x = 1{,}5h\left(1 - \frac{h_x}{0{,}8h}\right), \tag{8.1}$$

а на висоті h_x > 2/3*h*

$$r_x = 0{,}75h\left(1 - \frac{h_x}{h}\right). \tag{8.2}$$

Зона захисту двома блискавковідводами має більші розміри, чим сума захисту двох одиночних блискавковідводів (рис. 8.4).

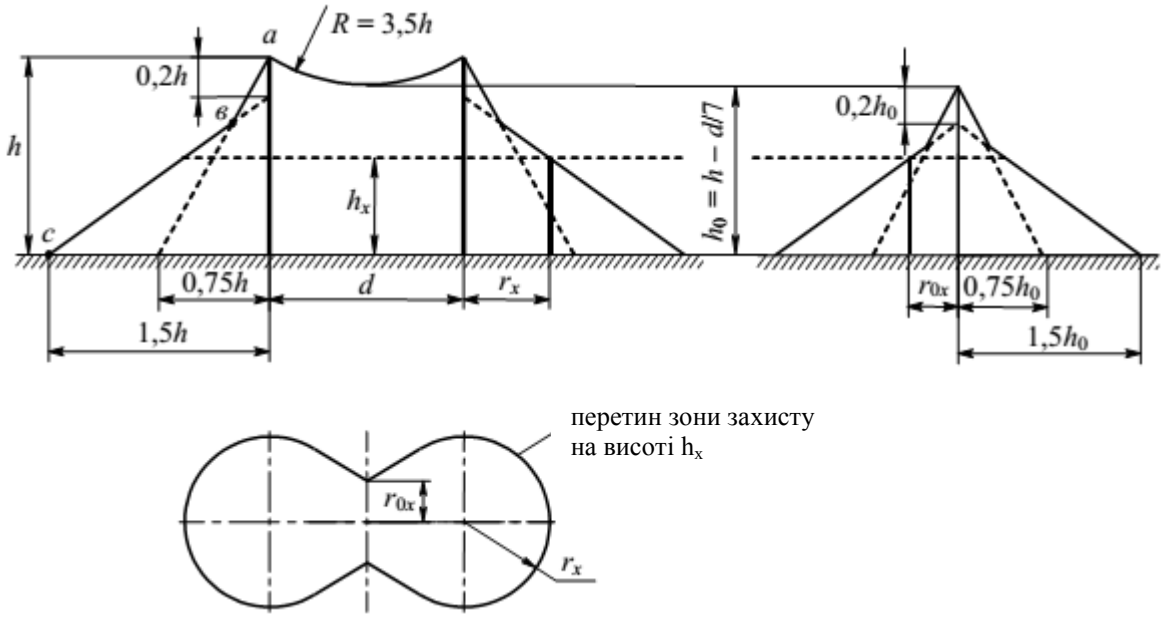


Рис. 8.4 - Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів

Відкриті розподільні підстанції розташовуються на великій території. Їх доводиться захищати декількома блискавковідводами. Зона захисту визначається тим же шляхом, що й зона захисту двох блискавковідводів.

8.3.3. Зона захисту тросового блискавковідводу

Тросові блискавковідводи використовуються в основному для захисту проводів ВЛ. У зв'язку із цим користуються не зонами захисту, а кутами захисту, тобто кутами між вертикальною лінією, перпендикулярної тросу, і лінією, що з'єднує проводу й трос (див. Рис. 8.5).

Лінії довжиною до 1000 км (ВЛ 500 кВ) дивуються блискавкою не менш 200 раз у грозовий сезон. Тому для ВЛ захист за допомогою тросових блискавковідводів набуває основного значення. Досвід експлуатації ВЛ показує, що кут захисту повинен бути 20–25° (див. Рис. 8.5). Опір заземлення опор із глухозаземленою нейтраллю повинне бути менш 5 Ом, а з ізольованої нейтраллю – менш 10 Ом.

Грозозахист підстанцій, крім захисту від прямих ударів блискавки, повинна містити в собі наступні види захистів:

1) від перекриттів при ударах блискавки в заземлені конструкції підстанцій, тобто від зворотних перекриттів із заземлених елементів на струмоведучі частини устаткування ;

2) від хвиль, що приходять із лінії.

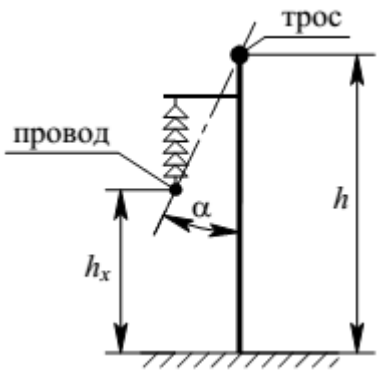


Рис. 8.5 - Зона захисту тросового блискавковідводу

Для виконання першої вимоги необхідний опір заземлення підстанції робити малим. Для напруги вище 1000 В опір заземлення підстанції $R_з \approx 0{,}5$ Ом. Зменшення $R_з$ – найбільш ефективний шлях захисту від зворотних перекриттів.

Для виконання другої вимоги застосовуються вентильні розрядники (РВ) і обмежники перенапруги (ОПН). Вентильний розрядник має пологу вольт-секундну характеристику (ВСХ). Це дозволяє йому захищати устаткування в широкому діапазоні змін довжин хвиль, що набігають із лінії (Рис. 8.6).

Для ефективного захисту необхідно, щоб:

1) що залишається напруга на робочому опорі РВ не перевищувало припустимого;

2) крутість хвилі, що набігає на підстанцію, була обмеженою.

Для виконання цих умов усі лінії, що підходять, що й відходять від підстанції, обладнаються тросовим захистом довжиною 2-3 км – захисні підходи. Кути захисту виконують менш 20º і навіть негативні. Наявність захищених підходів виключає прямий удар блискавки в проводу, що зменшує струми через РВ і, отже, що залишається напруга на робочому опорі РВ.

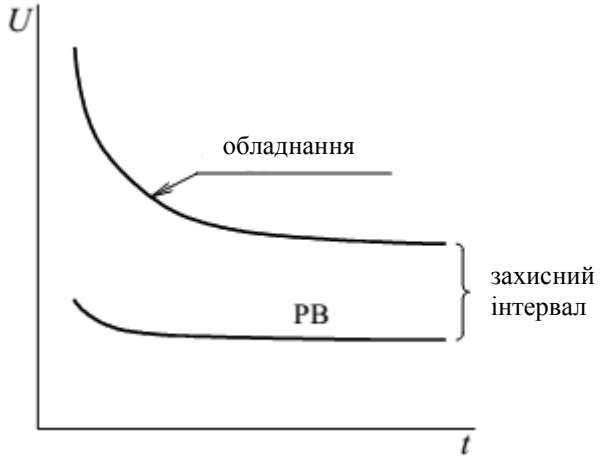


Рис. 8.6 - Вид вольт-секундних характеристик об'єкта, що захищається, і РВ

При русі хвилі по проведенню з лінії в захищеному підході виникає інтенсивне коронування, що згладжує фронт хвилі (зменшує крутість імпульсу) і зменшує амплітуду напруги.

8.3.3. Грозостійкість об'єктів

Повітряні лінії (ВЛ) електропередачі через велику довжину дивуються найбільше часто. Тому порушення роботи енергосистем викликається в основному порушенням ізоляції ВЛ.

При розрахунках грозостійкості ВЛ уводиться поняття рівня *грозостійкості*. Рівень грозостійкості оцінюється максимальною амплітудою струму блискавки I_0 і його крутістю a, при яких ще не відбувається порушення ізоляції лінії (крутість $a = \frac{I_0}{t_ф}$, де – тривалість фронту хвилі струму).

Показником грозостійкості вважають імовірне число років роботи установки без грозових відключень:

$$M = 1/N_{відкл},$$

де M – число років роботи без грозових відключень; $N_{відкл}$ – очікуване число випадків виникнення небезпечних грозових перенапруг у рік.

Наприклад, для ВЛ

$$N_{откл} = 0{,}9h \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot n_д \cdot \upsilon_{пер} \cdot \eta,$$

де h – середня висота підвісу троса або проводу;

L – довжина лінії;

$n_д$ – число грозових днів у році;

$\upsilon_{пер}$ – імовірність перекриття ізоляції ВЛ при ударі блискавки;

η – імовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу.

Аналогічно підраховується й грозостійкість інших об'єктів (підстанцій).

8.4. Засоби захисту від перенапруг

У мережах до 35 кВ часто для захисту використовують відкриті розрядні проміжки – захисні розрядники ("рогу") і трубчасті розрядники. Спрацьовування таких розрядників викликає різкий спад напруги, виникнення перехідних процесів і небезпечних перенапруг на поздовжній ізоляції високовольтних пристроїв (трансформатори, генератори, реактори і т.д.). Крім цього, такі розрядники мають круту вольт-секундну характеристику (ВСХ), тому що форма електричного поля різконеоднорідна. Це не дозволяє здійснювати захист об'єктів в області коротких часів впливу напруги (грозові перенапруги) (рис. 8.7).

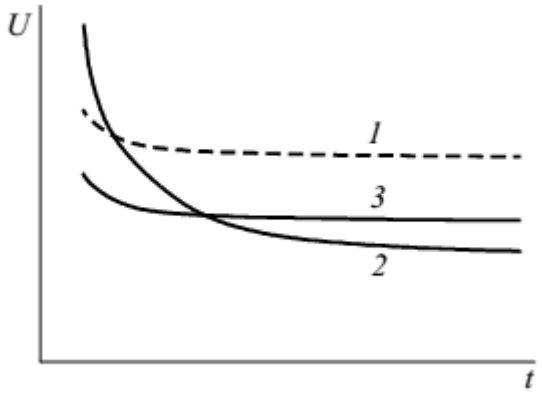


Рис. 8.7 - Вольт-секундна характеристика ізоляції, що захищається (1), іскрового проміжку з різконеоднорідним полем (2) і однорідним полем (3)

Одним із кращих розрядників такого типу є трубчастий розрядник (РТ), див. Рис. 8.8.

Електроди іскрового проміжку містяться в діелектричну трубу (*1)* з газогенеруючого матеріалу (наприклад, вініпласт). Основний проміжок S_1 забезпечує дугогасіння. Проміжок S_2 служить для відділення газогенеруючої трубки від мережі, щоб уникнути її розкладання від струмів витоку. З появою перенапруг пробивається S_1 і S_2. Через них протікає імпульсний струм і супровідний струм промислової частоти. Температура підвищується, відбувається інтенсивне газовиділення. Тиск підвищується до десятків атмосфер. Газ виходить через відкритий електрод (*3)*. Створюється поздовжнє дуття. Дуга видувається назовні. При переході струму через 0 дуга гасне. Через недоліки (див. ВСХ) РТ не застосовуються для захисту відповідального устаткування.

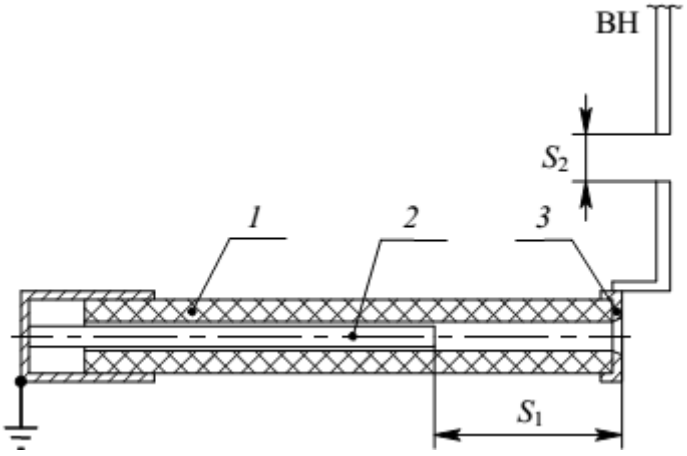


Рис. 8.8 - Пристрій трубчастого розрядника: *S*1 – основний проміжок; *S*2 – зовнішній іскровий проміжок; 1 – діелектрична труба; 2 – стрижневий електрод; 3 – відкритий електрод

Найбільш широке поширення в мережах високої напруги одержали вентильні розрядники (РВ), які мають пологу ВСХ. Вони складаються з декількох іскрових проміжків (ІП), включених послідовно, послідовних нелінійних робочих опорів (НО) і шунтувальних опорів ($R_ш$).

ІП служать для відділення НС від постійного впливу робочої напруги, що й протікає через нього струму, який руйнує НО. НО служить для обмеження супровідного струму до величини, необхідної для гасіння дуги. $R_{ш}$ служить для вирівнювання розподілу напруги по елементарних розрядних проміжках з метою виключення неправильного спрацьовування розрядника.

РВ обмежує перенапруги й гасить дугу супровідного струму без відключення мережі або підстанції.

Після гасіння дуги розрядник вертається у вихідний стан і готовий до повторної роботи. Число спрацьовувань РВ – 20 або 50.

У найпростіших РВ (типу РВС, РВП) струм гасіння дуги становить 80 А. Більш сучасні РВ мають струм гасіння дуги 250 А.

Матеріалами НС є виліт і тервит. Вольт-амперна характеристика їх описується вираженням

$$U = K \cdot I^{\alpha},$$

де α – коефіцієнт вентильності; *К* – постійна.

Для вилита α = 0,11 - 0,2; для тервита α = 0,15 - 0,25.

РВ діляться на 4 групи. Найкращими захисними властивостями мають РВ І групи, але вони й більш дорогі.

IV група – РВП (підстанційні);

III група – РВС (станційні);

II група – РВМ (магнітовентильні), РВМГ (магнітовентильні, грозові);

І група – РВТ (струмообмежуючі), РВРД (з дугою, що розтягується).

Істотне поліпшення захисних характеристик може бути досягнуте при відмові від використання ІП. Для цього потрібні матеріали з різко нелінійної ВАХ. Цим вимогам відповідає матеріал на основі оксиду цинку, з якого виготовляють нелінійні резистори – варистори. Захисні пристрої на їхній основі мають назву обмежники перенапруг нелінійні (ОПН). Коефіцієнт нелінійності ОПН становить α = 0,02-0,1. ОПН збираються з окремих дисків (варисторів), які містяться в герметичний порцеляновий корпус.

ОПН підключаються безпосередньо до мережі й заземлюються через реєстратор спрацьовувань. Малий коефіцієнт нелінійності ОПН дозволяє глибоко обмежувати перенапруги й застосовувати їх у мережах надвисокого й ультрависокого класів напруг.

8.5. Хвильові процеси в лініях

При прямому ударі блискавки (ПУМ) у лінію або поблизу її (у землю) виникають електромагнітні хвилі, що поширюються уздовж проводу ЛЕП. Атмосферні перенапруги на лініях і підстанціях визначаються рухом і переломленням цих хвиль. Тому аналіз хвильових процесів при розрахунках пристроїв грозо захисту має принципово важливе значення.

Хвиля поширюється уздовж лінії в повітрі зі швидкістю / м/мкс – швидкість світла (μ – відносна магнітна проникність середовища; ε – діелектрична проникність середовища).

Для повітря $\mu_0 = 1$; $\varepsilon = 1$.

Для кабельних ліній $\mu = 1$; $\varepsilon \approx 4$.

Отже, у кабелях $\upsilon \approx 0{,}5\ C$.

Напруга й струм хвилі зв'язані між собою:

Z – хвильовий опір.

Хвильовий опір одиничного проводу повітряної лінії $Z = 400…450$ Ом. Кабельні лінії мають $Z = 50…100$ Ом. У загальному випадку хвильовий процес у лініях визначається чотирма основними параметрами: ємністю C, індуктивністю L, активним опором проводу r і активною провідністю діелектрика g.

8.5.1. Заломлення й відображення хвиль у вузлових точках

Вузловою крапкою лінії називають таку точку, у якій стрибком змінюється співвідношення між електричним і магнітним полем, тобто змінюється хвильовий опір лінії ZЛ.

Для розрахунків переломлених і відбитих хвиль у вузлових точках використовують еквівалентну схему заміщення лінії з розподіленими параметрами на лінію із зосередженими параметрами за правилом Петерсена (див. рис. 8.9).

Розглянемо кілька прикладів відбиття й переломлення хвиль у вузлових точках при нескінченній довжині падаючої хвилі із прямокутним фронтом.

1. Кінець лінії (точка A) розімкнуть, $Z_2 = \infty$:

$$U_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{\text{пад}} = 2U_{\text{пад}}. \qquad (4.3)$$

Падаюча хвиля напруги відбивається повністю з тим же знаком, і в точці A, на кінці лінії, напруга подвоюється.

Для хвилі струму $i_2 = 0$, тобто переломлений струм дорівнює нулю:

$$i_{\text{отр}} = \frac{U_0}{Z_1} = -\frac{U_n}{Z_1} = -i_n. \qquad (4.4)$$

Падаюча хвиля струму відбивається від розімкнутого кінця повністю зі зворотним знаком, і струм у лінії дорівнює нулю.

2. Лінія наприкінці (точка A) закорочена, $Z_2 = 0$.

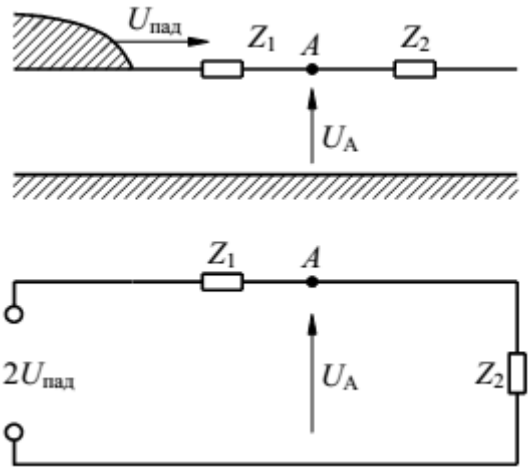


Рис. 8.9 - Еквівалентна схема заміщення довгої лінії за правилом Петерсена для розрахунків переломлених і відбитих хвиль у вузловій точці А: $U_{пад}$– падаюча хвиля напруги; Z_1 – хвильовий опір довгої лінії, по якій падає хвиля напруги; Z_2 – хвильовий опір довгої лінії після точці неоднорідності; А – вузлова точка (місце неоднорідності); U_A– напруга у вузловій точці

Падаюча хвиля напруги відбивається повністю від короткозамкненого кінця лінії зі зворотним знаком, напруга в точці *A* дорівнює нулю, а хвиля струму відбивається з тим же знаком – подвоюється.

3. Лінія наприкінці (точка А) погоджена, тобто $Z_1 = Z_2 = Z$.

Неважко бачити, що в цьому випадку падаючі хвилі напруги й струму не випробовують відбиттів і переломлень при падінні на погоджене *Z*.

Для системи (Рис. 8.9)

$$\begin{cases} U_{пред} = U_{пад} + U_{отр}; \\ i_{пред} = i_{пад} - i_{отр}, \end{cases} \tag{4.5}$$

де

$$i_{пад} = \frac{U_{пад}}{Z_1};\ -i_{отр} = \frac{U_{отр}}{Z_1};\ i_{прел} = \frac{U_{прел}}{Z_2} \tag{4.6}$$

Визначимо $U_{пред}$ і $U_{отр}$ через $U_{пад}$.

Вирішуючи спільно (4.5), (4.6), маємо

$$U_{прел} = U_{пад} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha U_{пад}; \tag{4.7}$$

$$U_{отр} = U_{пад} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_{пад} \tag{4.8}$$

де коефіцієнт переломлення

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}; \tag{4.9}$$

коефіцієнт відбиття

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}. \qquad (4.10)$$

Звідси рівняння (4.5) запишеться як

$$\alpha U_{\text{пад}} = U_{\text{пад}} + \beta U_{\text{пад}} \qquad (4.11)$$

де $\alpha - \beta = 1$.

Визначимо границі зміни α і β.

1. Припустимо, що $Z_2 = 0$, тоді з вираження (4.9) $\alpha = 0$. При $Z_2 = \infty$, $\alpha = 2$. Отже, α змінюється в діапазоні $0 \le \alpha \le 2$.

2. Припустимо, що $Z_2 = 0$, тоді з вираження (4.10) $\beta = -1$. При $Z_2 = \infty$, $\beta = 1$. Отже, β змінюється в діапазоні $-1 \le \beta \le +1$.

8.5.2. Перенапруги при несиметричному відключенні фаз

При несиметричному відключенні фаз лінії електропередачі, коли відключаються одна або дві фази лінії, можливе виникнення резонансних перенапруг (феррорезонанс). Такі випадки можуть мати місце при обриві одного проводу на лінії, перегорянні плавких вставок, однофазному або двофазному короткому замиканні, неодночаснім відключенні фаз вимикача, що може мати місце при пофазному керуванні вимикачами і т.д.

У мережах з ізольованої нейтралью при несиметричних комутаціях можуть утворюватися резонансні контури, якщо до лінії підключені трансформатори на холостому ходу або мало навантажені. У таких контурах і виникають феррорезонансні (ФР) перенапруги.

Загальна схема, у якій можливе виникнення ФР перенапруг, представлена на Рис. 8.10.

Ключем $Р_A$ умовно показане місце розриву фази *A*. На схемі так само показані ємності фаз між собою (C'_{12}) і на землю (C'_0) до розриву (до ключа ($Р_A$) і відповідні ємності C_{12} і C_0 послу розриву.

Нейтраль системи-джерела може бути заземлена або ізольована (ключ $Р_Н$), а нейтраль трансформатора навантаження повинна бути ізольована. Це характерно для всіх ліній, аж до 110 кВ включно. (При заземленні нейтралі навантаження феррорезонанс не виникає).

Приймемо, що у фазі *A* обірвалося проводу й упало на землю, тобто розімкнемо ключ $Р_A$ й заземлимо фазу *A* з боку системи ключем Р. Тоді схема заміщення буде, як на Рис. 8.11, де трикутник ємностей C_{12} замінений на відповідну йому еквівалентну зірку, а трикутником ємностей C'_{12} можна зневажити, тому що вони не впливають на розглянуті процеси.

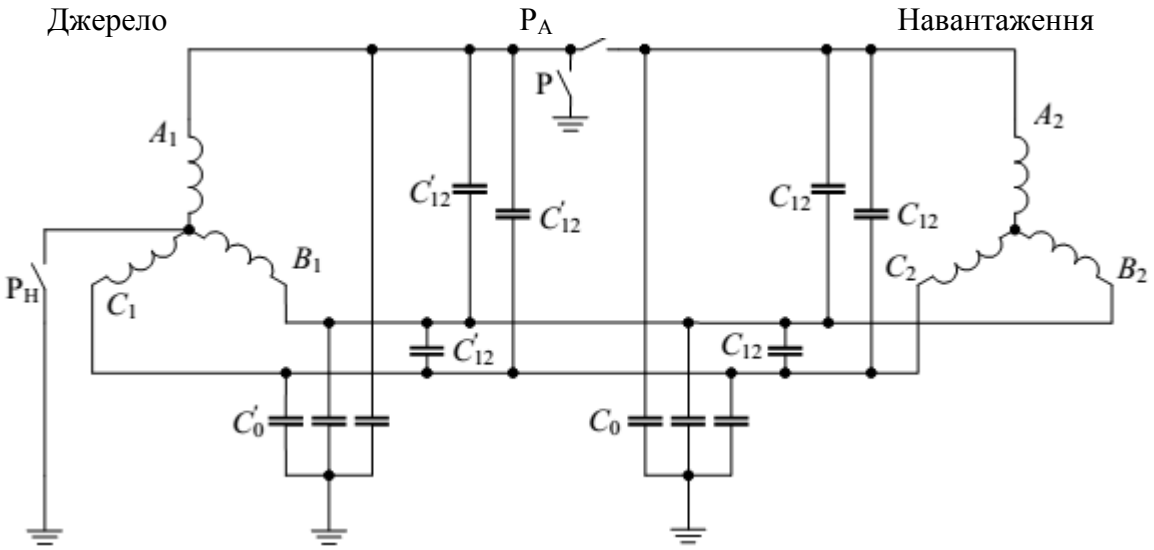


Рис. 8.10 - Схема для дослідження перенапруг при несиметричному відключенні фаз: *A*1, *B*1, C1 – фази джерела; *A*2, *B*2, C2 – фази навантаження – трансформатора з ізольованої нейтраллю; *C*′12 – міжфазні ємності системи до ключа P*A*; *C*′0 – ємності фаз на землю системи до ключа P*A*; C12 – міжфазні ємності навантаження; C0 – ємності фаз навантаження;д P, P*A*, PH – ключі

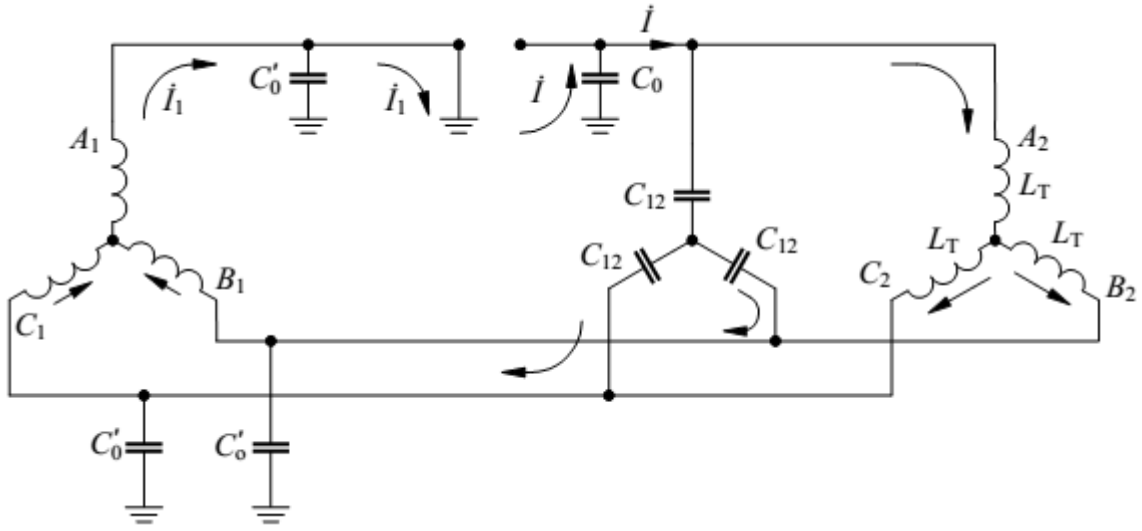


Рис. 8.11 -. Схема заміщення мережі з несиметричною комутацією (один провід заземлений)

Струм I_1 у фазі *A* після обриву проводу буде йти на землю через місце заземлення, а потім через ємність IC_0 буде вертатися знову на проводу до навантаження. Тут він розгалужується: частина струму тече через ємність IC_{12}, а інша частина – через обмотки (індуктивності) *LT* трансформатора. Увесь струм замикається через фази B_1 і C_1 джерела. Потенціали нульових точок трансформатора навантаження й зірки міжфазних ємностей C_{12} однакові.

Тому схему на рис. 8.11 можна перетворити в однофазну (Рис. 8.12).

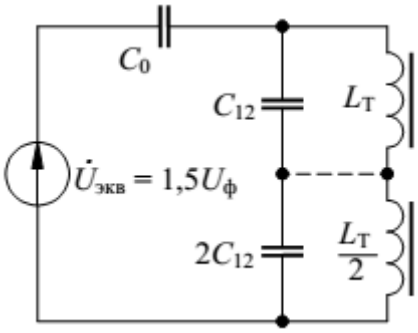


Рис. 8.12 - Однофазна схема заміщення для схеми рис. 8.11

Відповідно до цієї схеми

$$\dot{U}_{екв} = 1{,}5\dot{U}_L + \dot{U}_{C_0}$$

або

$$\dot{U}_{екв} = 1{,}5\dot{U}_Ф = 1{,}5\dot{U}_L - \dot{U}_{C_0} \qquad (4.12)$$

Перенапруги виникають завдяки проходженню струму через послідовно з'єднані ємності C_0 і індуктивність 1,5 $L_т$, які утворюють коливальний контур. Тут виникає необхідність визначити величини напруг на ємності й індуктивності. Рівняння (4.12) може бути вирішене графічно. Графічний розв'язок представлений на рис. 8.12.

З Рис. 8.12 видне, що для схеми рис. 8.11 можливі 3 режиму, відповідні до крапок *а, б, в.* Два із цих режимів (точці *б* та *в*) є індуктивними, а один (точка *а*) – ємнісний. Стійкими є тільки два режими – точці *а* й *б*. Режим у точці *в* нестійкий і обов'язково переходить або в точку *б*, або в точку *а*. Якщо в схемі переважає індуктивний режим, то система повернеться в точку *б* і перенапруг не виникне. Якщо переважає ємнісний режим, то виникає гармонійний резонанс (ферорезонанс), який приводить до значних перенапруг (як видне з рис. 8.13), в 3 рази й більш. Крім цього, на трансформаторі навантаження змінюється порядок чергування фаз на зворотний – це "перекидання" чергування фаз. При цьому якщо трансформатор мав моторне навантаження, те після обриву проводу (або неодночасної комутації вимикачів) напрямок обертання двигунів зміниться на зворотне.

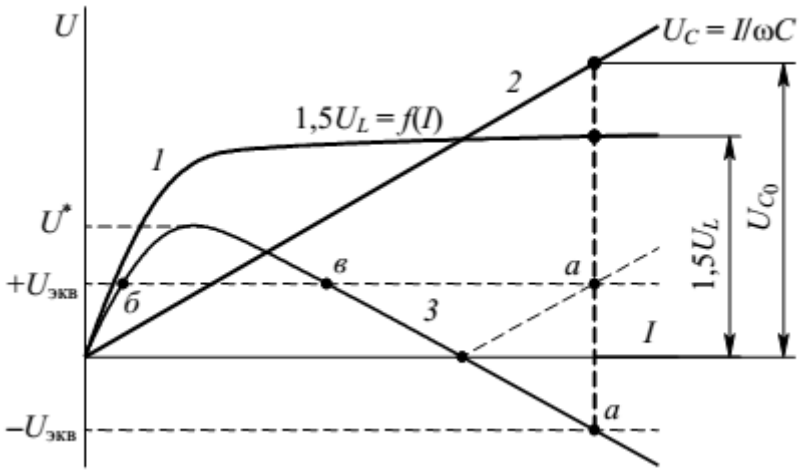


Рис. 8.13 - Графічний розв'язок рівняння для коливального контуру з нелінійною індуктивністю: *1* – зміна напруги на нелінійній індуктивності (обмотці трансформатора); *2* – зміна напруги на ємності; *3* – сумарна зміна напруги в контурі

Найбільш радикальним засобом, що усувають подібні явища, може бути заземлення нейтралі трансформатора навантаження. Однак ця вимога не завжди здійсненна, навіть для систем 110 кВ. Тому необхідно прагнути до зменшення ймовірності несиметричних відключень (відмова від плавких запобіжників і вимикачів з пофазним керуванням, не слід довгостроково залишати включеними холості або слабко навантажені трансформатори).

8.6. Хвильові процеси в обмотках трансформаторів

Хвилі грозового (і комутаційного) характеру, що набігають по лінії електропередачі на підстанцію, приводять до виникнення імпульсних напруг, що впливають на обмотку трансформатора (двигуна, генератора й ін.). Характер пробоїв ізоляції обмоток указує на важливу роль хвильових процесів.

У трансформаторі під дією імпульсу напруги виникають складні електромагнітні процеси, що приводять до перенапруг як між витками котушок (поздовжня ізоляція), так і між котушками й заземленими частинами (головна ізоляція).

Сумарна довжина проводів в обмотках трансформаторів високої напруги досягає декількох кілометрів (довга лінія). При впливі імпульсної напруги в обмотці виникають хвильові процеси, що мають деяку аналогію із процесами в лініях електропередачі. Однак схема заміщення обмотки трансформатора, навіть без обліку активного опору й провідності, значно складніше схеми заміщення лінії (рис. 8.14).

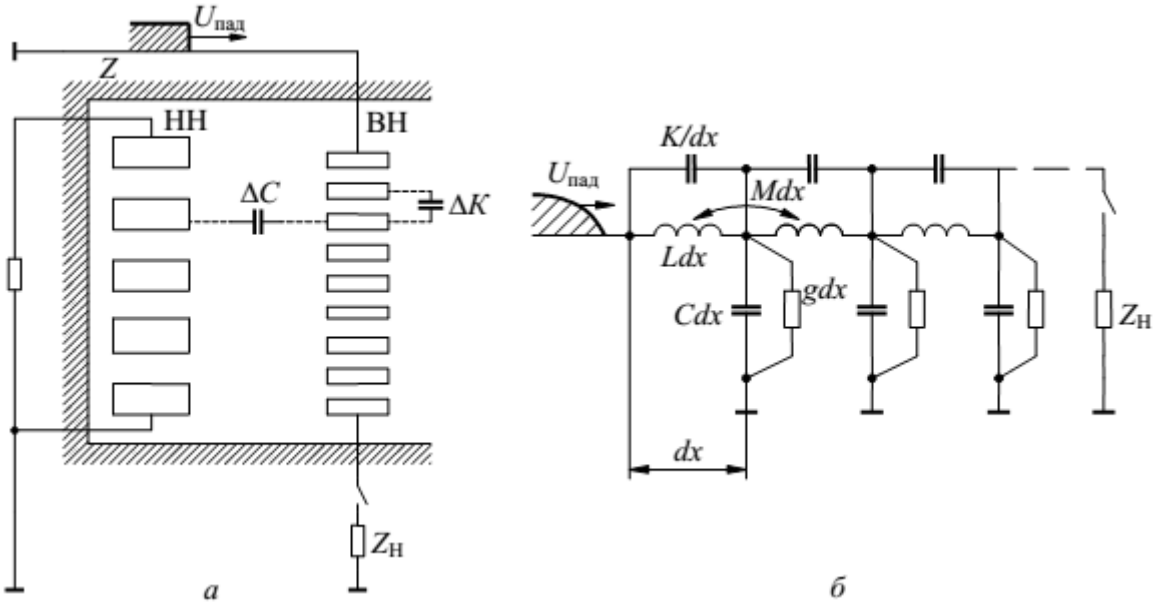


Рис. 8.14 - Конструктивна схема однофазної котушкової обмотки (*а*) і електрична схема заміщення (*б)* високовольтного трансформатора: *Z*Н– опір нейтралі трансформатора

Через те, що проводу обмотки навивається навколо магнітопроводу, з'являються два додаткові параметри схеми заміщення: ємність між сусідніми витками або котушками (поздовжня ємність *К*) і взаємна індуктивність *М*(*х)* кожного витка з усіма іншими витками обмотки. Величини *L, C, K* – середні значення індуктивності, ємності щодо заземлених елементів і сусідніх обмоток і поздовжньої ємності на одиницю довжини обмотки.

У зв'язку із цим обмежимося якісним розглядом процесів у трансформаторах. Електромагнітний перехідний процес у трансформаторі залежить від ряду факторів:

• схеми з'єднання обмоток;

• режиму нейтралі (заземлена або ізольована);

• конструкції обмоток;

• падіння хвилі по одній, двом, трьом фазам ЛЕП.

Спочатку розглянемо основні закономірності перехідного процесу для однофазного трансформатора з котушковою обмоткою. На обмотку ВН впливає прямокутна нескінченно довга хвиля напруги. Увесь процес впливу хвилі можна представити, що полягають із трьох стадій:

а) початковий процес (діє фронт хвилі) $t = 0$;

б) режим, що встановився (перехідні процеси закінчилися*)* $t = \infty$;

в) перехідний процес (вільні коливання) $0 < t < \infty$.

8.6.1. Початковий розподіл напруги вздовж обмотки трансформаторів

У початковий момент (t = 0), коли впливає фронт хвилі напруги (крутість фронту більша, що еквівалентно високій частоті), індуктивність обмотки не попускає струм. Отже, струм буде протікати тільки по ємностях C и K й схема заміщення прийме вид, представлений на рис. 8.15, *а*.

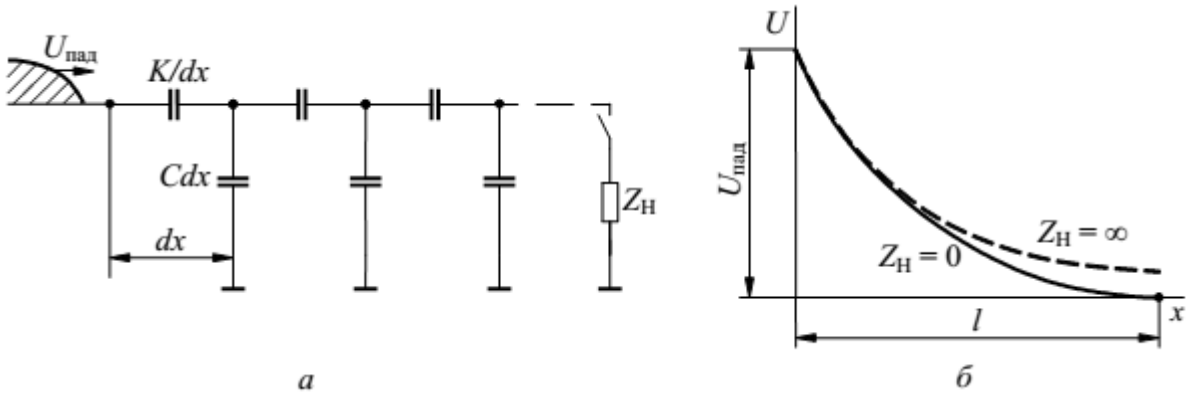


Рис. 8.15 - Початковий розподіл напруги по обмотці трансформатора: *а* – електрична схема заміщення для початкового процесу (t = 0); *б* – розподіл напруги уздовж обмотки для t = 0

Для цієї початкової стадії розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора запишеться у вигляді

$$U_{нач} = U_{пад} e^{-\alpha l\left(\frac{x}{l}\right)}$$

де l – довжина обмотки.

З формули видна більша роль параметра

$$\alpha l = \sqrt{\frac{C_{обм}}{L_{обм}}}$$

де $C_{обм}$ – ємність обмотки між початком і кінцем; $L_{обм}$– індуктивність обмотки між початком і кінцем.

Для сучасних трансформаторів $5 < \alpha l \leq 10$. На значній частині обмотки розподіл напруги буде однаково як для режиму заземленої нейтралі 0 ZH=, так і з ізольованої нейтраллю $Z_H = \infty$ (див. рис. 8.15, *б)*.

У режимі із заземленої нейтраллю кінець обмотки буде мати потенціал, рівний 0. У режимі з ізольованої нейтраллю кінець обмотки буде мати ємність C_{dx} щодо землі (див. схему заміщення), на якій буде спадання напруги ΔU. У початковому режимі основне спадання напруги прикладається до початку обмотки через украй нерівномірний розподіл напруги. У зв'язку із цим ізоляція перших витків або котушок робиться посиленою.

8.6.2. Сталий режим (або примушений режим)

Для імпульсної прямокутної хвилі напруги цей режим відповідає тривалому часу додатка напруги $t \to \infty$. Через обмотку протікає "наскрізний" примушений струм $i_{пр}$. Ємнісні струми дорівнюють нулю, тому що ємності

вже зарядилися. Схема заміщення представлена тільки індуктивними елементами (рис. 8.16).

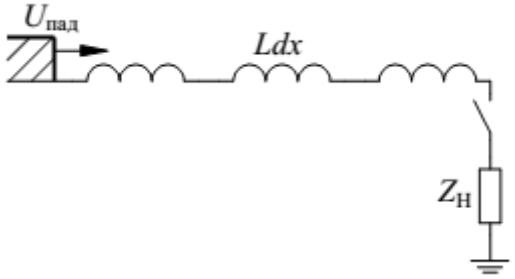


Рис. 8.16 - Схема заміщення обмотки трансформатора в режимі, що встановився

Оскільки обмотка однорідна, то розподіл напруги по котушках (виткам) буде рівномірним, але воно залежить від режиму нейтралі. У випадку заземленої нейтралі примушена напруга $U_{пр}$ рівномірне спадає до нуля (рис. 8.17, *а*) і може бути записане рівнянням

$$U_{пр(x)} = U_{пад}(1 - x/l)$$

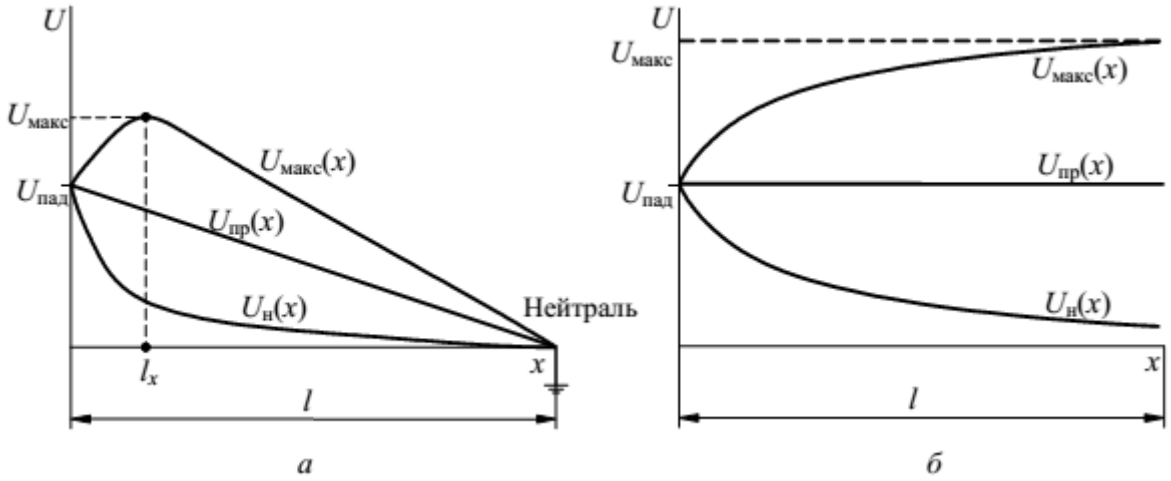


Рис. 8.17 - Розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора в різних стадіях: *а* – опір нейтралі дорівнює нулю; *б* – опір нейтралі дорівнює нескінченності

Для ізольованої нейтралі струм через обмотку не тече: $i_{пр}= 0$. Отже, $U_{пр}$ на початку й наприкінці обмотки однаково (рис. 8.17, *б)*. $U_{пр}= U_{пад}$. Звідси випливає, що у випадку з ізольованої нейтраллю кінець обмотки повинен мати таку ж ізоляцію, як і початок.

8.6.3. Перехідний процес

З рис. 8.17 випливає очевидна невідповідність між початковим, що й установилися режимами в обмотці трансформатора. Це приводить до виникнення перехідного процесу, де віссю коливань є прямі режиму, що встановився. Схема заміщення представлена на рис. 8.14, *б*, де кожне гніздо (*L, C, K)* представляє коливальний контур із власною частотою коливань від

ω_1 до ω_∞. При цьому в обмотці можуть бути досягнуті максимальні потенціали більше $U_{пад}$:

$$U_{\max} = U_{пр(x)} + \sum_{k=1}^{n} U_{k(x)}$$

де $Uk_{(x)}$– вільна складова коливань, обумовлена як сума ординат (амплітуд) усіх гармонік у даній точці обмотки.

Максимальні потенціали уздовж обмотки описуються, що обгинає максимальних потенціалів. Величина *Umax* залежить від режиму нейтралі. При заземленої нейтралі $Umax \le (1{,}2\ldots1{,}3)\ U_{пад}$ і припадає на початкові витки обмотки (див. рис. 8.17,*а*). При ізольованої нейтралі в перехідному режимі$Umax \le 2U_{пад}$і припадає на кінець обмотки (див. рис. 8.17, *б)*.

Перенапруги в перехідному режимі небезпечні для головної ізоляції. Тому головна ізоляція трансформатора повинна бути посилена:

• для заземленої нейтралі в початковій частині обмотки (1/3 від початку обмотки);

• для ізольованої нейтралі посилення необхідно робити по всій довжині, але особливо наприкінці обмотки.

8.6.4. Розподіл напруги вздовж обмоток трифазного трансформатора

Імпульсні перенапруги впливають на трансформатор, як правило, з боку високої напруги. При цьому хвиля перенапруги може приходити як із ВЛ, так і по кабельній вставці. Розподіл напруги по обмотці трифазного трансформатора залежить:

• від схеми з'єднання обмоток;

• режиму нейтралі.

Обмотки трансформатора з високої сторони для імпульсного впливу навантажені на повітряну ЛЕП або на кабель. Хвильовий опір повітряної лінії залежно від конструкції й класу напруги становить $Z_Л$= 250…500 Ом. Хвильовий опір кабелю $Z_К$ = 50…100 або 100…150 Ом. Хвильовий опір обмоток трансформатора $Z_Т$ = 10 000 Ом, тобто трансформатор навантажений на малий опір у порівнянні із власним. Для спрощення можна представити, що обмотки, по яких не приходять хвилі перенапруги, закорочені. Розглянемо різні схеми з'єднання, наведені на рис. 8.18.

8.6.4.1. Зірка із заземленою нейтраллю

Хвиля перенапруги, приходячи по одній фазі *А* (див. рис. 8.18, *а*). Розподіл напруги уздовж обмотки таке ж, як у випадку однообмотувального трансформатора із заземленої нейтраллю (див. рис. 8.17, *а*). Те ж саме виходить при впливі перенапруги по двом і трьом фазам одночасно.

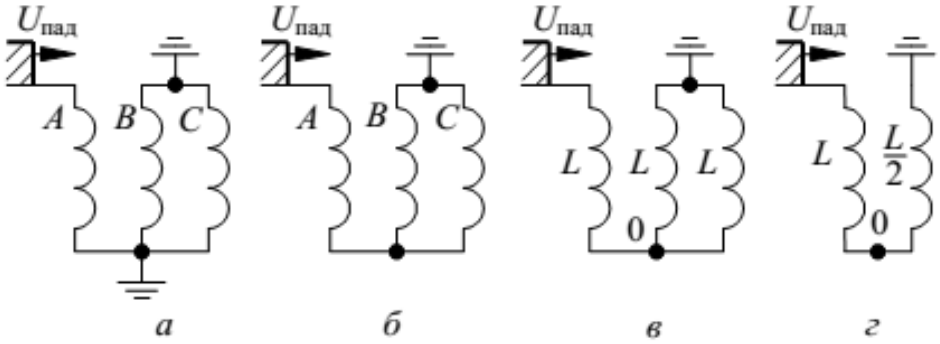


Рис. 8.18 - Еквівалентні схеми заміщення для аналізу перенапруг в обмотках трансформаторів: *а* – "зірка" із заземленої нейтраллю; *б* – "зірка" з ізольованої нейтраллю; *в*, *г*– схема заміщення для "зірки" з ізольованої нейтраллю

8.6.4.2. Зірка з ізольованою нейтраллю

Загальний метод розрахунків перехідного процесу залишається колишнім: визначаються криві первісного розподілу, що установився, потенціалів, по обмотках і по різниці цих кривих обчислюються складо вивільного режиму. Можливі два випадки: падіння хвилі на одну фазу (рис. 8.18, *б)* і падіння хвилі на дві фази одночасно. У першому випадку хвиля падає на фазу *А*, дві інші фази заземлені, маємо модифікацію схеми, наведену на рис. 8.18, *в*, *г.* Розподіл напруги падаючої хвилі по високовольтних обмотках трансформатора одержимо, як показано на рис. 8.19.

Розподіл, що *встановився,* Uпр має перелом у точці з'єднання обмоток (нейтраль), оскільки індуктивний опір двох паралельне з'єднаних *обмоток* В *та* С удвічі менше опір *обмотки* А. Потенціал нейтралі в перехідному режимі $U_{макс}$ не перевершує $2/3U_{пад}$.

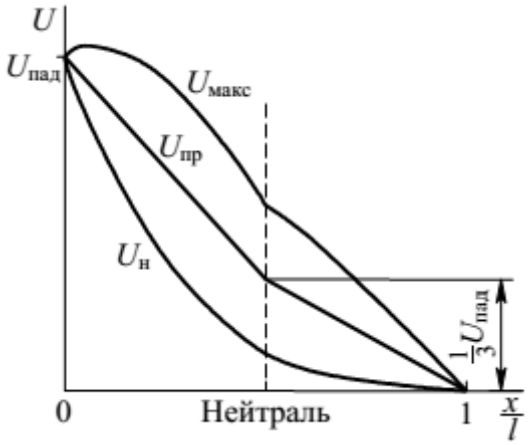


Рис. 8.19 - Розподіл напруги по високовольтних обмотках трифазного трансформатора при падінні хвилі по фазі *А*: *U*н – початковий розподіл падаючої напруги уздовж обмоток; *U*пр – примушений розподіл напруги; *U*макс – що обгинає перехідної напруги

У випадку падіння хвилі по двом фазам (рис. 8.20, *а*) схема заміщення прийме вид, наведений на рис. 8.20, *б*. Розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора презентовано на рис. 8.21..

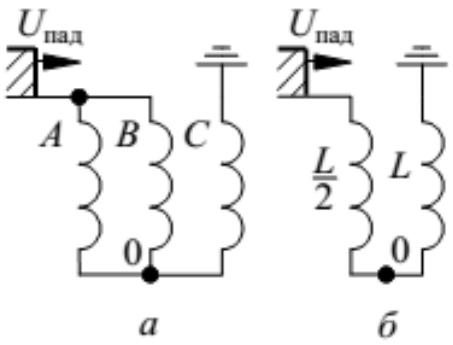


Рис. 8.20 - Еквівалентні схеми заміщення для аналізу перенапруг в обмотках трансформаторів при падінні хвиль по двом фазам: *а* – "зірка" з ізольованої нейтраллю; *б* – еквівалентна схема заміщення

Потенціал нейтралі може перевищувати $U_{пад}$ у перехідному режимі. Виникає небезпека перенапруги для головної ізоляції в області нейтралі.

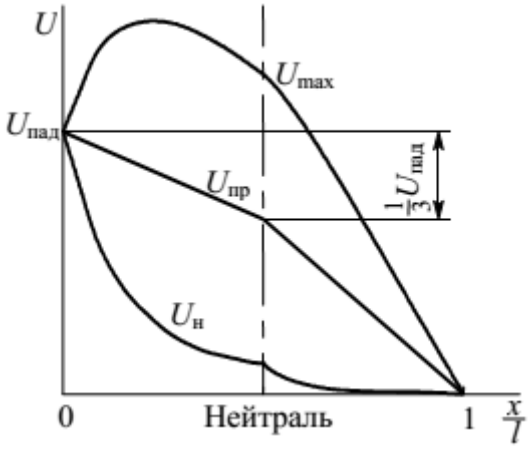


Рис. 8.21 - Розподіл напруги по високовольтних обмотках трифазного трансформатора при падінні хвилі по двом фазам А и В: *U*н – початковий розподіл падаючої напруги уздовж обмоток; *U*пр – примушений розподіл напруги; *Umaxc*–, що обгинає перехідної напруги

При падінні хвиль по трьом фазам на три обмотки трансформатора режими розподілу напруги по обмотках такі ж, як для однообмотувального трансформатора з ізольованої нейтраллю (див. рис. 8.17, *б)*.

8.6.4.3. З'єднання обмоток трикутником

Схема заміщення для трансформатора з обмотками, з'єднаними в трикутник, наведена на рис. 8.22, *а*. При падінні хвилі на обмотку по фазі *А* можна вважати, що при цьому фази *С* и *В* заземлені. У цьому випадку процес в обмотці *АС* такої ж, як в обмотці *АВ*, тобто як для однофазного трансформатора із заземленої нейтраллю (див. рис. 8.17, *а*).

Падіння хвиль по двом фазам – *А* и *В* – приводить до того, що в обмотках *АС* і *ВР* розподіл спадання напруги у всіх режимах однаково й відповідає режиму однофазного трансформатора із заземленої нейтраллю

(див. рис. 8.17, *а*). Розподіл напруги в обмотці *AB* можна визначити методом накладення (див. рис. 8.22, *б)*.

Спочатку визначимо напругу в обмотці *AB* при падінні хвилі тільки по фазі *A.* Точка *B* може вважатися заземленої. Отже, процес розподілу напруги буде, як для однофазного трансформатора із заземленої нейтраллю. Потім визначимо напругу в обмотці *BA* при падінні хвилі по фазі *B.* Точку *A* можна вважати заземленої. Розподіл таке ж, як і в попередньому випадку. Підсумовуючи початкові $U_{н,}$ що й установилися *(*примушені) $U_{пр}$ розподілу напруги, будуємо криві відповідно початкового, що й установився розподілів в обмотці *AB* при падінні на неї двох хвиль. За знайденими значенням $U_{н}$ і $U_{пр}$ визначаємо криву максимальних перенапруг *Umax*. З Рис. 8.22, *б* видно, що максимальні напруги, що досягають 2 $U_{пад}$, виникають у середині обмотки. Отже, тут створюється найбільша небезпека для головної ізоляції.

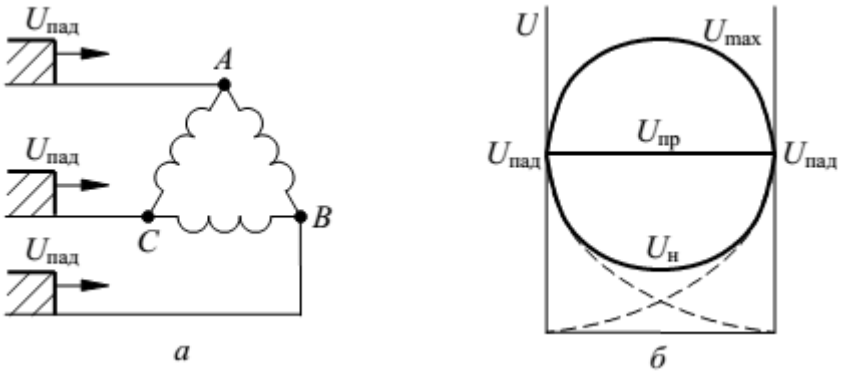


Рис. 8.22 - Розподіл потенціалів в обмотці трансформатора, з'єднаного в трикутник при симетричному падінні хвиль: *а* – падіння хвиль по трьом фазам обмотки, з'єднаних у трикутник; *б* – розподіл напруги в одній з фаз

При падінні хвиль по трьом фазам процеси в кожній фазі будуть аналогічні вищерозглянутим для фази *AB*.

Для ослаблення ефектів перенапруги й захисту обмоток трансформаторів від пробою використовуються різні способи введення в конструкцію обмоток спеціальних пристроїв, які суттєво знижують перенапруги, що впливають як на головну ізоляцію, так і на поздовжні кільця, що наприклад екранують, петльові обмотки, шарові обмотки, екрани.

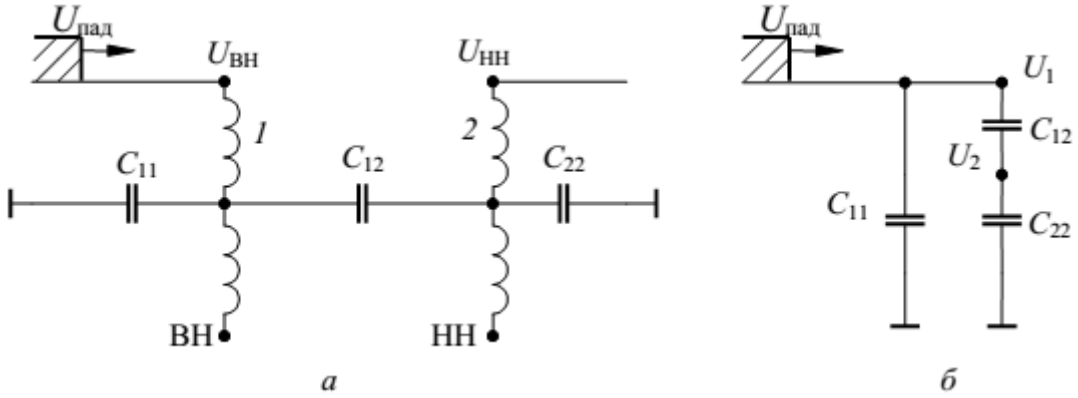
8.6.5. Передача хвиль перенапруг із однієї обмотки в іншу

При падінні електромагнітної хвилі на одну з обмоток трансформатора електромагнітні процеси в ній збуджують високі потенціали в іншій обмотці. Можливі два види передачі ВН.

1. Ємнісна передача потенціалу в трансформаторах (див. рис. 8.23). Звичайно у високовольтних трансформаторах ємність на землю обмотки високої напруги багато менше, чим ємність на землю обмотки низької напруги, тобто $C11 << C22$. Еквівалентна схема заміщення, представлена на рис. 8.23, *б*, дозволяє оцінити напругу на вторинній обмотці залежно від напруги хвилі, що приходить на первинну обмотку:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_{12} + C_{22}}{C_{12}},$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} = U_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{22}}{C_{12}}}$$



а *б*

Рис. 8.23 - Ємнісна передача електромагнітної хвилі між обмотками трансформатора при приході хвилі перенапруги по одній з фаз: *а* – загальна схема заміщення; *б* – еквівалентна електрична схема для розрахунків

При ємнісній передачі електромагнітної хвилі між обмотками трансформатора коефіцієнт трансформації не відіграє ролі й передача залежить від відношення C_{22}/C_{12}. Значні потенціали можуть бути на обмотці *2* (НН), тільки коли C_{22} мало.

2. Електромагнітна передача напруги в трансформаторах. Падіння хвилі на обмотку НН презентовано на Рис. 8.24.

У цьому випадку можливі два варіанти:

а) якщо фази ВН приєднані до ВЛ, то ріст потенціалу буде незначний як на початку, так і в середині обмотки;

б) якщо фази АВС від’єднанні від ВЛ, то

$$U_A = U_B = U_C \approx U_{пад} \cdot k_{тр}$$

де $k_{тр}$ – коефіцієнт трансформації.

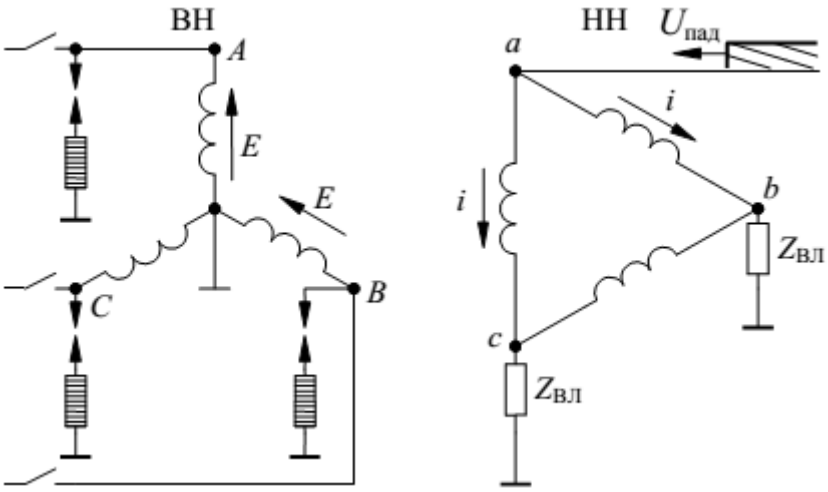


Рис. 8.24 -Електромагнітна передача при падінні хвилі перенапруги на обмотку низької напруги

Це небезпечний режим і для внутрішньої, і для зовнішньої ізоляції трансформатора. Отже, потрібна установка захисних апаратів від перенапруг на виводах трансформатора.

Наприклад: Хвиля перенапруги падає з боку низької напруги, $U_{пад}$ = 10 кВ, $k_{тр}$= 10/0,4 = 25. За таких умов $U_A = U_B = U_C = U_{пад} \cdot k_{тр}$= 250 кВ, тобто для трансформатора класу 10 кВ ця напруга в 3 рази вище імпульсної іспитової напруги (75…80 кВ).

8.7. Перенапруги при відключенні ненавантажених ЛЕП і батарей конденсаторів

8.7.1. Відключення ненавантажених ВЛ

При холостому ході лінії струм випереджає напругу практично на 90° (лінія, як ємність). При відключенні лінії, коли контакти вимикача починають розходитися, між ними загоряється дуга. При проходженні струму через 0 (момент t_0 на рис. 8.25), дуга у вимикачі згасне. Лінія залишається зарядженої. На лінії залишається напруга $+U_ф$, а напруга джерела продовжує змінюватися по синусоїді. Через напвперіод напруга джерела досягає значення $– U_ф$. Отже, між контактами вимикача напруга досягає значення $2U_ф$. Міцність проміжку між контактами вимикача за напвперіод зростає не більш ніж до $2U_ф$ (повітряні вимикачі) і $U_ф$ (масляні вимикачі).

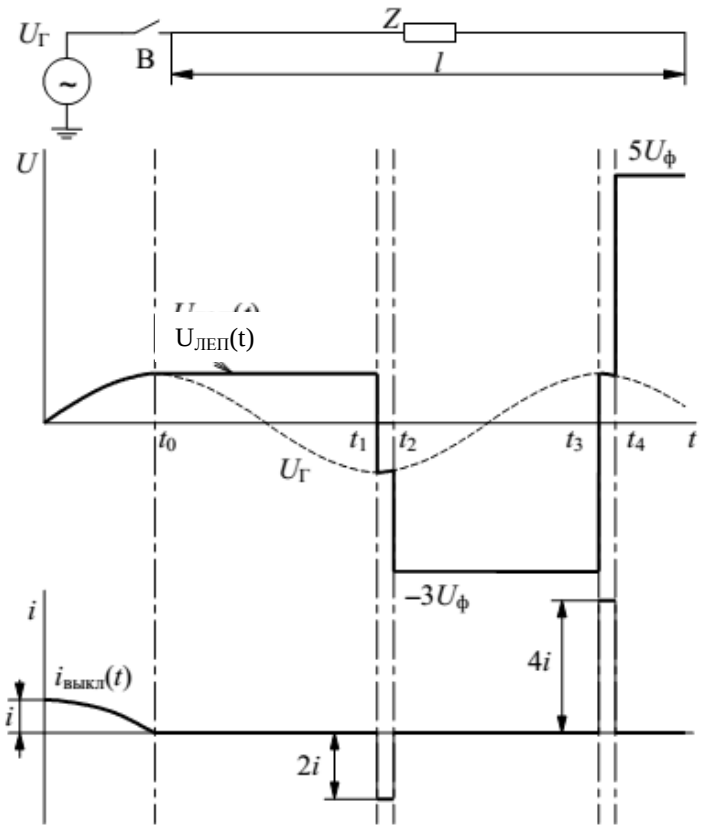


Рис. 8.25 -Відключення холостої лінії від джерела при наявності повторного запалювання дуги

Досить імовірним є повторне запалювання дуги у вимикачі в момент t_1, коли напруга джерела рівна – $U_ф$. При цьому лінія буде перезаряджатися від $+U_ф$ до $-U_ф$. А по ній буде поширюватися хвиля напруги $-2U_ф$ і проходити струм $i = -\frac{2U_ф}{Z}$.

Перезарядження ВЛ відбувається в результаті поширення по лінії хвилі із крутим фронтом $-2U_ф$ (компенсація $+U_ф$ і зарядка до $-U_ф$). На кінці розімкнутої лінії хвиля $-2U_ф$ відіб'ється з тим же знаком, тобто досягне $-4U_ф$, але результуюча напруга буде $-4U_ф + U_ф = -3U_ф$. Хвиля струму відіб'ється зі зворотним знаком (див. рис. 8.26).

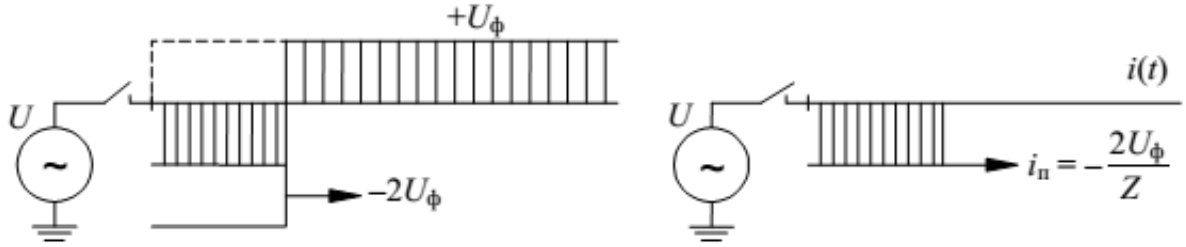


Рис. 8.26 - Хвильові процеси при відключенні холостих ліній

При цьому на лінії буде встановлюватися напруга $-3U_ф$ (див. рис. 8.25), а сумарний струм на ділянках лінії, де пройшла відбита хвиля, стає рівним нулю. Тому, коли відбита хвиля дійде до джерела (контакти вимикача), струм у вимикачі проходить через 0 і дуга гасне (момент t_2). Цей час пробігу хвилі

струму й напруги значно менше напівперіоду. Але напруга джерела змінюється синусоїдально до $+U_ф$, а між контактами вимикача напруга досягає $4U_ф$. І знову можливе запалювання дуги і т.д.

Якби повторні запалювання дуги тривали необмежено довго, то перенапруги на лінії могли б досягти як завгодно великої величини. Але сучасні вимикачі не дозволяють цього. У переважній більшості випадків при відключенні ненавантажених ліній відбувається не більш одного повторного запалювання дуги. Тому напруга на лінії у випадку джерела нескінченної потужності не повинне перевищувати $3U_ф$. Оскільки лінії мають значну довжину, необхідно враховувати зниження напруги джерела за час подвійного пробігу хвилі по лінії, а також втрати в лінії. Ці фактори зменшують можливі амплітуди перенапруг на лінії. Перенапруги при відключенні холостих ліній для ряду енергетичних систем стають найбільш важливим видом перенапруг.

Можливі види *обмеження* подібних перенапруг:

• Збільшення швидкості відновлення електричної міцності, тобто швидкості розбіжності контактів вимикача. Це радикальний засіб. Однак зі збільшенням швидкодії вимикачів сильно зростають перенапруги при відключенні холостих (ненавантажених) трансформаторів.

• Використання вимикачів із шунтувальними опорами. Недолік – складність конструкції й значна вартість.

• Використання вентильних розрядників, що дозволяє надійно обмежувати перенапруги при довжині ліній не більш 200 км. У більш довгих лініях потрібні спеціальні розрядники з підвищеною пропускною здатністю по струму.

• Приєднання електромагнітних трансформаторів напруги.

8.7.2. Відключення батарей конденсаторів

Батареї конденсаторів застосовуються в електричних системах для поліпшення коефіцієнта потужності, регулювання напруги й збільшення пропускної здатності далеких ЛЕП.

При відключенні батарей конденсаторів, так само як і при відключенні холостих ліній, ємнісний струм обривається в момент проходження його через нуль при максимумі напруги на конденсаторі. Через полперіода напруга на контактах вимикача досягає $2U_ф$, що може викликати повторне запалювання дуги у вимикачі і т.д., як і при відключенні холостих ліній. Для обмеження цих напруг тут можуть бути застосовані й застосовуються спеціальні швидкодіючі вимикачі, що не дають повторних запалювань дуги.

8.7.3. Дугогасні апарати

При замиканні одного з фазних проводів на землю необхідно погасити дугу струму (див. рис. 8.27).

Одним з найпоширеніших засобів зменшення (компенсації) струму замикання на землю є включення в нейтраль трансформатора регульованого реактора, який називають:

• дугогасильною котушкою;
• котушкою Петерсена (по імені винахідника);
• настроєною індуктивністю.

При замиканні проводу на землю на нейтралі з'являється напруга стосовно землі, рівне фазній напрузі, тому струм, що протікає через котушку, рівний

$$I_{L\text{к}} = \frac{U_\Phi}{\omega L_\text{к}}$$

де $L_\text{к}$ – індуктивність котушки; ω – кутова частота мережі.

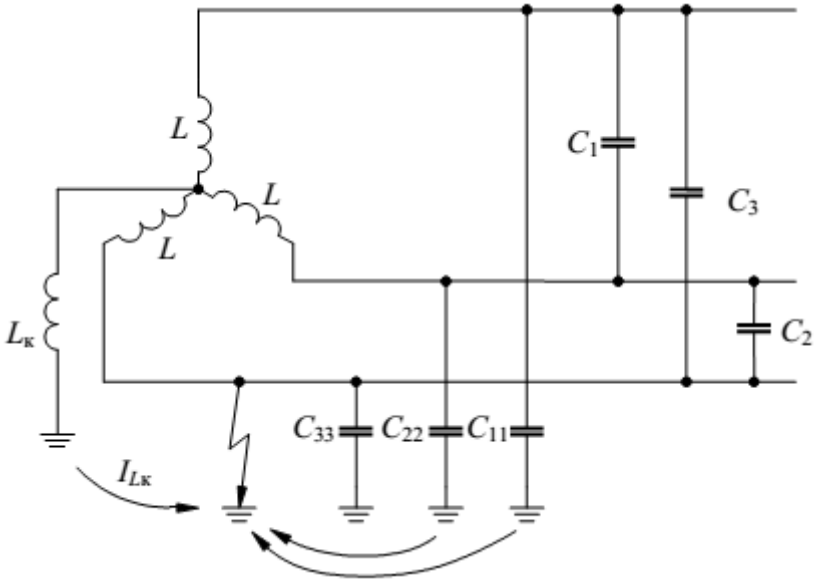


Рис. 8.27 - Схема заміщення мережі з дугогасильною котушкою: *L*к – індуктивність дугогасильної котушки; *L* – індуктивність обмотки трансформатора; *C*1, *C*2, *C*3 – ємність фаз лінії між собою (міжфазна ємність); *C*11, *C*22, *C*33 – ємність фаз щодо землі; *I*0 – струм короткого замикання; *IL*к– струм через дугогасильну котушку

В ідеальному випадку струм у місці замикання проводу на землю дорівнює нулю й дуга гасне. Цього можна досягти, якщо включити в нейтраль джерела (трансформатора) індуктивність такої величини, щоб струм, що протікає через неї, був рівний по величині й зрушать по фазі на 180º щодо струму в місці замикання на землю. Таке можливо при виконанні рівності

$$3\omega \cdot C_{11} \cdot U_\text{ф} = \frac{U_\text{ф}}{\omega L_\text{к}},$$

звідки

$$\omega L_\text{к} = \frac{1}{3\omega C_{11}}.$$

Ця умова ідеального настроювання дугогасильної котушки. Звідси можна знайти індуктивність $L_\text{к}$ при відомій ємності фази щодо землі C_{11}.

У дійсні (реальних) умовах струм у місці замикання на землю не дорівнює нулю. Його величина обумовлена:

1) ступенем розладу котушки $L_к$;

2) активними втратами в котушці;

3) струмами витоку із проводу на землю;

4) вищими гармоніками в ланцюзі розряду.

Заземлення нейтралі через дугогасильну котушку застосовується при струмах замикання на землю більш 10 А в мережах 35 кВ і більш 30 А в мережах 6…10 кВ (усі мережі з ізольованої нейтраллю). При менших струмах дуга замикання на землю звичайно гасне мимовільно.

Ступінь розладу котушки індуктивності звичайно виражають через відношення струмів. Можливі два випадки:

$$\frac{I_0 - I_{L_к}}{I_0} > 0 \text{ и } \frac{I_0 - I_{L_к}}{I_0} < 0.$$

Якщо відношення більше нуля ($I_0 > I_{Lк}$), то має місце недокомпенсація. Коли відношення менше ($I_0 < I_{Lк}$), має місце перекомпенсація. При рівності $I_0 = I_{lк}$ осягається повна компенсація (ідеальний випадок). Включення дугогасильної котушки в нейтраль трансформатора при несиметричній системі ємностей ($C_{11} \neq C_{22} \neq C_{33}$) приводить до виникнення напруги на нейтралі трансформатора щодо землі в робочому режимі. Це недолік дугогасильної котушки. Для усунення або зменшення несиметрії ємностей на лінії повинна виконуватися й виконується транспозиція проводів.

Дугогасильна котушка має сталевий сердечник із зазорами щодо індуктивностей обмотки. Змінюючи величину зазору, можна встановлювати (регулювати) бажану вольт-амперну характеристику котушки.

Якщо нейтраль силового трансформатора недоступна, то в якості дугогасильного апарата застосовують спеціальний дугогасильний трансформатор. Гасіння дуги трансформатором відбувається так само, як і дугогасильною котушкою. Відмінність тільки в конструктивному виконанні, але він може бути включений незалежно від з'єднання обмоток силового трансформатора, оскільки підключається безпосередньо до збірних шин підстанції.

ВИСНОВОК

Системи заземлення та захист від перенапруг — відносно молода галузь людської діяльності. Прогрес в області ТВН безпосередньо впливає на рішення вузлових проблем електроенергетики. Основні проблеми ТВН, можна сказати, для даного рівня електропостачання в основному вирішені. Потрібна доробка тих напрямків, які зв'язані зі статистичним характером процесів: грозові й комутаційні перенапруги, погодні умови. Потрібна доробка захисних і комутаційних апаратів, які поліпшать координацію ізоляції всіх елементів мережі електропостачання – від генератора до споживача.

Особливо слід зазначити проблему діагностики ізоляції. Сучасні умови експлуатації високовольтного устаткування ставлять завдання безперервного моніторингу її стану й прогнозування терміну служби в конкретних умовах експлуатації. Це завдання стає особливо актуальної в умовах гострого дефіциту засобів по заміні застарілого штатний строк, що й відробив свій, устаткування. Розв'язок цієї проблеми є важливим завданням і вимагає залучення молодих талановитих кадрів.

Для виконання завдань ТВН потрібні інженери з гарною підготовкою в області теорії електрофізичних наук, експерименту й експлуатації. Творчий підхід до справи, працьовитість і ентузіазм завжди були відмінною рисою фахівців в області ТВН.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. Міненерговугілля України, 2017 https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : ДП НТУКЦ «АсЕнерго», 2020. 304 с.
3. Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами). Навчально-методичний посібник для магістрантів. – Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна. - 2003. - 52с.– 2006. – 280 с.
4. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібник / Бржезицький В. О. та ін. ; за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків : НТУ «ХПІ». Торнадо, 2005. 930 с.
5. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
6. Техніка та електрофізика високих напруг. Лабораторний практикум / Шостак В. О., Проценко О. Р., Абрамов В. Б., Гаран Я. О. К.: КПІ ім.. Ігоря Сікорського, 2020. – 125 с.
7. Техніка високих напруг: Конспект лекцій (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 0906 Електротехніка (6.050701 Електротехніка та електротехнології) спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») / Укладач: Рой В.Ф.; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 171 с.
8. Техніка високих напруг: Курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. Р. Проценко Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 345 с.
9. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник . – Рівне : НУВГП, 2018. − 187 с. http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/25808
10. Електропостачання та енергоменеджмент : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. – Київ, 2022. – 208 с.
11. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь / Суходоля О. М.– К. : НІСД, 2022. – 49 с. – https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09
12. Управління проєктами: навч. посіб. / О.С. Войтенко. – Київ: КНУБА, 2020. – 276 с.
13. Блага Н. В. Управління проєктами: навч. посібник. Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ, 2021. 152 с.

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Васюченко Павло Вікторович

СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Конспект лекцій
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
денної і заочної форм здобуття освіти за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 21.05.2026. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 6,08. Обсяг 3,525 Мб. Зам. № 237/26.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна