

## Лекція 14

### ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ

#### 1. Короткі замикання в мережах зовнішнього електропостачання

При КЗ в живильних мережах напругою 330 кВ та вище, окрім періодичної та аперіодичної складових струму короткого замикання, можна також виділити вищі гармонічні складові, обумовлені розподіленою поперечною ємністю ЛЕП. При наявності в ЛЕП зосередженої поздовжньої ємності струм КЗ містить і субгармонічну складову зі зниженою частотою порівняно з промисловою. Складові струму КЗ з урахуванням ємності ЛЕП при КЗ у різних точках мережі обчислюють за допомогою комп'ютерної техніки.

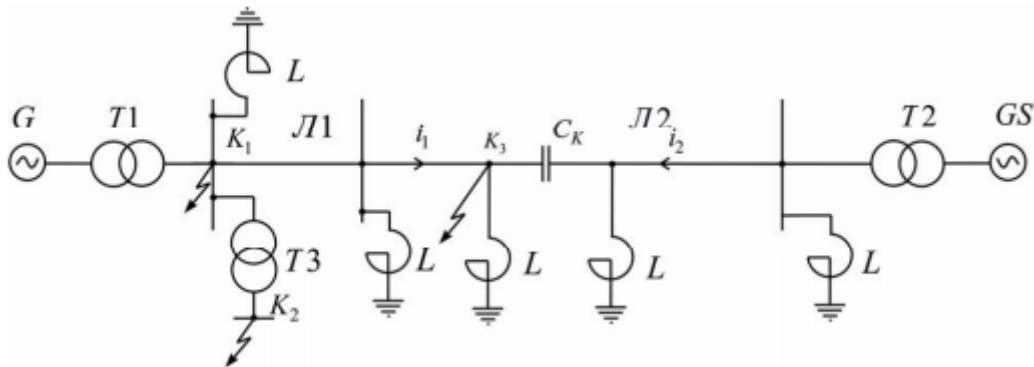


Рис. 1. . Розрахункова схема для однієї з аналізованих умов

Розрахункова схема для однієї з умов на рис. 1 дає змогу встановити загальні залежності для розрахунку струмів КЗ у таких ЛЕП. З відсутністю поздовжньої ємності в ЛЕП (КЗ у точці  $K1$  – на шинах джерела, а в точці  $K2$  – за трансформатором) повний струм у місці трифазного КЗ має лише періодичну (промислової частоти) та аперіодичну складові. Ці складові, як і ударний струм КЗ, визначають за наведеними раніше формулами. Аналогічно струм КЗ розраховують при поздовжній ємності, якщо КЗ виникає за певним опором

(точка КЗ). Тут у сумарному опорі ЛЕП ураховують опір  $x_K = -1/(\omega C_K)$ , де  $C_K$  – поздовжня ємність мережі.

При трифазному КЗ у будь-якій точці ЛЕП повний струм КЗ складається з суми струмів  $i_1$  та  $i_2$ , утворених джерелами, розміщеними по різні сторони від поздовжньої ємності. Розташування точки КЗ відносно ємності та джерела теж ураховують. Струм КЗ від генераторів (точка КЗ та джерело – з однієї сторони відносно поздовжньої ємності) містить періодичну складову промислової частоти і періодичні та аперіодичні складові від додаткового джерела у вигляді ємності. Цей струм визначають за залежностями стосовно випадків відсутності поздовжньої ємності. Струм КЗ від джерела електричної системи, яке відносно точки КЗ розташовано за поздовжньою ємністю (точки К1 та К3), має періодичну складову промислової частоти, періодичні та субгармонічну складові за рахунок ємності мережі. Останню розраховують загалом за формулою:

$$i_{c \max} = \sqrt{2} E_{GS}'' \exp(-t / T_c) \cos \omega_c t / (\sqrt{3} x_{2pez}). \quad (1)$$

Тут  $x_{2pez} = \omega_c L_{2pez} - x_K$  – результуючий реактивний опір;  $T_c = 2L_{2pez} / r_{2pez}$  – постійна часу затухання струму субгармоніки;  $L_{2pez}$ ,  $r_{2pez}$  – результуюче значення індуктивності та активного опору елементів схеми, розміщених відносно точки КЗ з тієї сторони, що й поздовжня ємність;  $\omega_c = 1/\sqrt{L_{2pez} C_K}$  – кутова частота струму субгармоніки. Ударний струм, утворений джерелом, зв'язаним з точкою КЗ зосередженою поздовжньою ємністю,

$$i_y = \sqrt{2} E_{GS}'' [1 + \exp(-t_y / T_c)] / (\sqrt{3} x_{2pez}), \quad (2)$$

де  $t_y = \pi / (\omega - \omega_c)$  – момент часу появи ударного струму (завдяки наявності поздовжньої ємності  $t_y > 0,01$  с).

Повний струм трифазного КЗ наближено визначають за виразом

$$i_{\max} = [i_{II1\max} + i_{II2\max} + i_{C0\max} \exp(-t / T_c)] \times \sin((\omega - \omega_c) \cdot t / 2) + i_{a0} \cdot \exp(-t / T_a), \quad (3)$$

де  $i_{II1\max}$ ,  $i_{II2\max}$  – амплітуди періодичної складової струму промислової частоти генераторів станції та електричної системи:

$$i_{II1\max} = \sqrt{2} \cdot E_G'' / (\sqrt{3} x_{1pez});$$

$$i_{II2\max} = \sqrt{2} \cdot E_{GS}'' / (\sqrt{3} x_{2pez});$$

$i_{C0\max} = \sqrt{2} \cdot E_{GS}'' / (\sqrt{3} x_{2pez})$  – початкове значення амплітуди струму субгармоніки;  $i_{a0} = \sqrt{2} \cdot E''_{GS} / (\sqrt{3} x_{1pez})$  – початкове значення аперіодичної складової струму генератора;  $x_{1pez}$ ,  $x_{2pez}$  – результуючі опори елементів схеми до точки КЗ для відповідних джерел  $G$  та  $GS$ ;  $T_a = L_{1pez} / r_{1pez}$  – постійна часу затухання аперіодичної складової струму генератора. Ударний струм розраховують за формулою

$$i_y = \sqrt{2} \cdot E_G'' \cdot [1 + \exp(-t_y / T_a)] / (\sqrt{3} \cdot x_{1pez}) + \sqrt{2} \cdot E_{GS}'' \cdot [1 + \exp(-t_y / T_c)] / (\sqrt{3} \cdot x_{2pez}). \quad (4)$$

У ЛЕП напругою 330 кВ і вище відповідно до віддалення від джерела живлення періодична складова КЗ за амплітудою зменшується. Вільні періодичні складові в повному струмі КЗ при цьому зростають.

Відокремлення від ЕЕС синхронного генератора або групи генераторів звичайно відбувається при вимиканні КЗ. Після деякої паузи під час дії АПВ генераторів на стійке КЗ початковий струм повторного КЗ може перевищити початковий струм першого пошкодження, що слід урахувувати при виборі або ж перевірці апаратів за умов аварійного режиму.

Розрахункові умови визначаються реактивною потужністю, яку «скидає» генератор під час паузи АПВ, параметрами застосованої системи збудження генератора, межами регулювання збудження, тривалістю першого КЗ та його електричною віддаленістю, а також паузою АПВ. Зростання реактивної потужності, скинутої генератором, наближення зовнішнього опору до 0,6...0,7 відносних одиниць виміру щодо номінальних параметрів генератора та збільшення тривалості початкового аварійного режиму супроводжуються зростанням відношення початкового струму повторного КЗ до початкового струму першого пошкодження. Початковий струм повторного КЗ не перевищує початкового струму першого пошкодження за умов:

- відокремлення гідрогенератора від ЕЕС протягом 0,5 с, а турбогенератора – не більше 1 с з часу виникнення аварійного режиму;
- оснащення генераторів вентиляційною системою збудження, якщо пауза АПВ не перевищує 0,7 с з моменту вимкнення турбогенератора, та 1 с – з моменту вимкнення гідрогенератора. Тоді при виборі або ж перевірці апаратів та провідників за умов КЗ струм першого пошкодження – розрахунковий.

Генератор може бути оснащений повільнодіючою системою збудження (електромашинний збуджувач) з напругою збудження при форсуванні, яка відповідає збудженню генератора на холостому ході. Тому з тривалістю аварійного режиму понад секунду, віддаленістю КЗ в 0,6...0,7 відносних одиниць та повним скиданням генератором реактивної потужності початковий струм повторного КЗ більший за струм першого пошкодження на 20...25 %. За даних умов незалежно від паузи АПВ розрахунковим вважається початковий струм повторного КЗ. Останній на 25 % більший за початковий струм першого пошкодження.

## **2. Замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю**

Цей вид замикання – найпоширеніший у мережах з малим струмом замикання на землю. Процеси, що відбуваються в таких мережах досить складні й істотно залежать від параметрів та схеми мережі, опору контуру перебігу струму замикання.

Опір нульової послідовності в мережах напругою 6–35 кВ визначається в основному ємністю елементів мережі відносно землі. Тому замикання на землю в мережах 6–35 кВ супроводжуються перебігом малих струмів пошкодження, які менші за струми навантаження. Це особливо характерне для мереж з ПЛ напругою 6–10 кВ, де ємність провідників відносно землі невелика. В мережах з КЛ та протяжними ПЛ напругою 10–35 кВ можливі значні струми замикання на землю.

Для поліпшення гашення дуги та запобігання переходу замикання на землю в міжфазне КЗ у мережах, що розглядаються, встановлюють дугогасильні котушки, з допомогою яких компенсується основна гармоніка ємнісного струму замикання на землю. Як наслідок – результуючий струм пошкодження у таких мережах в усталеному режимі різко зменшується. При замиканні на землю струм, що перебігає пошкодженим з'єднанням (рис. 2,а), дорівнює сумі струмів непошкоджених елементів, що визначаються ємністю та активним опором ізоляції відносно землі кожного з них, та струму дугогасильної котушки (при її наявності).

У некомпенсованих мережах струми основної гармоніки на пошкоджену та непошкоджену з'єднання спрямовані в протилежні сторони, що пояснюється розташуванням джерела напруги нульової послідовності в місці замикання (рис. 2,б). Тому струм  $I_C$ , який визначається ємнісним опором непошкодженої мережі, у пошкоджену елементі перебігає в напрямку до шин, а в непошкоджену — від них.

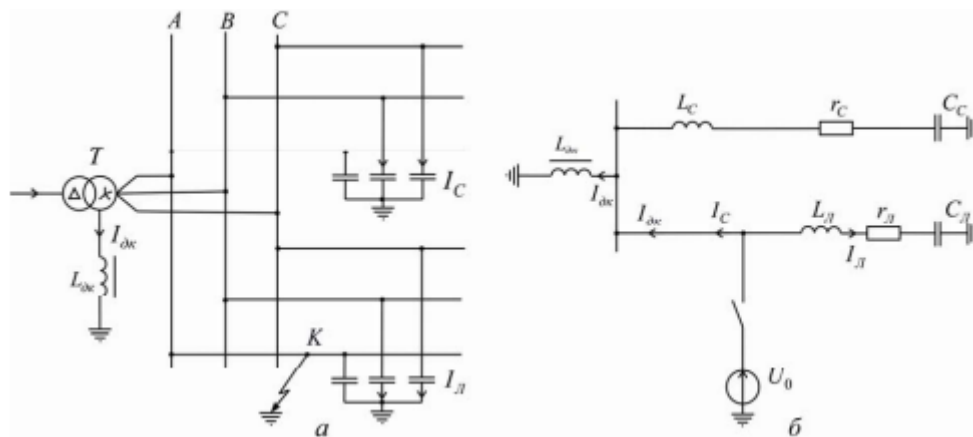


Рис. 2. Приклад однофазного КЗ в електричній мережі: а – розрахункова схема електричної мережі; б – схема заміщення для нульової послідовності

При вмиканні дугогасильної котушки  $L_{ДК}$  в нейтраль одного з трансформаторів фаза основної гармоніки струму пошкодження залежатиме від співвідношення між значенням ємності непошкоджених ділянок та індуктивністю котушки. Якщо переважає індуктивна складова струму пошкодження, то фази реактивних складових струму пошкодження однакові на

непошкодженому (ємнісний струм, спрямований до лінії) і пошкодженому (індуктивний струм, спрямований до шин) приєднаннях.

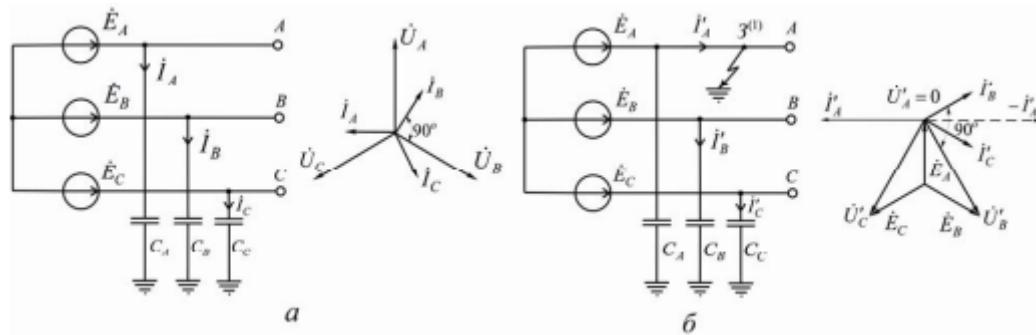


Рис. 3. Схеми заміщення і векторні діаграми напруг та ємнісних струмів мережі з ізольованою нейтраллю в режимах: а – нормальному; б – з однофазним КЗ на землю

Значення і фаза струмів замикання визначаються напругою нульової послідовності  $U_0$ . Найбільше значення  $U_0$  буде при замиканнях на землю без перехідного опору і дорівнюватиме фазній напрузі мережі. При замиканнях через перехідний опір значення  $U_0$  встановлюється співвідношенням між опором нульової послідовності та перехідним опором. Кут між напругою  $U_0$  та струмом замикання на землю завжди однаковий і дорівнює куту опорів нульової послідовності мережі. Наявність перехідного опору зменшує значення  $U_0$  і кут відносно фазної напруги. Для аналізу однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю розглянемо відповідні схеми заміщення та векторні діаграми (рис. 3). Виходячи з практичних завдань розрахунку аварійних режимів мережі, введемо низку припущень:

- ємності окремих фаз відносно землі, рівномірно розподілені вздовж провідників, заміняємо еквівалентно зосередженими ємностями  $C_A = C_B = C_C = C$ , ввімкненими посередині ЛЕП;
- не враховуємо провідності витoku струму, а також активні та індуктивні опори ЛЕП, малі порівняно з ємнісними опорами фаз відносно землі;
- опори навантаження та ЛЕП (фазні) вважаємо симетричними.

Ємнісні струми фаз  $I_A = j\omega C U_A$ ;  $I_B = j\omega C U_B$ ;  $I_C = j\omega C U_C$  тотожні за модулем, а за фазою випереджають відповідні напруги на кут  $90^\circ$ . У нормальному режимі сума струмів дорівнює нулю (рис. 3,а). Напруга нейтралі  $U_0$  (між нульовою точкою мережі та землею) визначається за виразом

$$\dot{U}_0 = (\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C) / (Y_A + Y_B + Y_C) = 0, \quad (5)$$

де  $Y_A = Y_B = Y_C = Y = Y\omega C$  – ємнісні провідності окремих фаз у нормальному режимі.

При замиканні на землю без перехідного опору в точці пошкодження аварійна фаза А набуває потенціалу землі (рис. 3,б). Тому  $U_A = 0$ ;  $Y_A = \infty$ .

Напруга нейтралі  $U_0$  стає рівною  $E_A$ . Напруги непошкоджених фаз відносно землі зростають в  $\sqrt{3}$  рази і складають

$$\dot{U}'_B = \sqrt{3} \cdot E_A \cdot \exp(-j \cdot 150^\circ); \dot{U}'_C = \sqrt{3} \cdot E_A \cdot \exp(j \cdot 150^\circ).$$

Ємнісні струми також збільшуються в  $\sqrt{3}$  рази. Випереджаючи напруги  $U_B$  та  $U_C$  на  $90^\circ$ , ці струми через землю повертаються у пошкоджену фазу, струм якої дорівнює струмові замикання на землю

$$I'_A = \dot{I}'_{3A} = 3 \cdot \dot{I}_0 = -(\dot{I}'_B + \dot{I}'_C) = 3 \cdot j\omega C \dot{E}_A, \quad (6)$$

де  $I_0$  – струм нульової послідовності при замиканні на землю

Струми  $I_{3A}^{(1)}$  та  $I_0$  випереджають е.р.с.  $E_A$  на  $90^\circ$  і визначаються ємностями фаз живильної системи заданої напруги, а також значенням  $E_A$ . Ось чому в розгалужених мережах значної ємності струм замикання на землю більший. Так, при замиканні на землю фази однієї з кількох ЛЕП, увімкнених до загального джерела, сумарний струм з  $I_{3\Sigma}$  в місці замикання за рахунок ємнісних струмів усіх ЛЕП складе

$$\dot{I}_{3\Sigma} = 3\dot{I}_{0\Sigma} = 3j\omega C_\Sigma \dot{U}_\Phi. \quad (7)$$

Тут  $C_\Sigma$  – сумарна ємність фази всіх ЛЕП, причому  $C_\Sigma = C_0 l$ , де  $C_0$  – питома ємність фази мережі відносно землі, Ф/км;  $l$  – загальна довжина провідника однієї фази мережі. Струм замикання на землю для мережі з КЛ можна також визначити за емпіричною формулою

$$I_{3\Sigma} = \sum_{i=1} (95 + 2,84 \cdot q_i) \cdot U_n \cdot l_i / (2200 + 6 \cdot q_i), \quad (8)$$

де  $U_n$  – номінальна лінійна напруга мережі, кВ;  $l_{ii}$  – довжина КЛ, км;  $q_i$  – переріз кабелю, мм<sup>2</sup>.

Оцінка аварійних режимів замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю має принципово важливе значення для підприємств та об'єктів щодо надійності електропостачання, електробезпеки та конструктивного виконання устаткування. Це характерне, передусім, для гірничих підприємств – потужних та важливих споживачів електричної енергії з специфічними особливостями (складні гірничогеологічні умови, вибухонебезпечність вугільних шахт), сукупність яких якісно відрізняє їх від загальнопромислових об'єктів. За приклад візьмемо аварійні режими шахтних електричних мереж.

Для обмеження умов відкритого іскроутворення в підземних виробках шахт у зв'язку з комутаційними перенапругами, а також попередження неправильних дій захисту від струмів витоку через погіршення стану ізоляції електроустановок зазначені мережі живляться від спеціальних розподільних або триобмоткових трансформаторів (35–110)/6/6 кВ.

У шахтній електричній мережі спостерігається найбільша кількість пошкоджень. Причина – несвоєчасне усунення несправностей в електроустаткуванні, а також помилкові дії обслуговуючого персоналу. В

умовах експлуатації шахтного електроустаткування вугільний пил та волога осідають довкола елементів устаткування, внаслідок чого можуть виникати струми витоку, які за певних обставин сприяють КЗ з небезпечними наслідками. Основна причина КЗ у підземних шахтних мережах – механічне пошкодження електроустаткування. Найчастіше зазнають ушкоджень шахтні броньовані та особливо гнучкі кабелі. У шахтних виробках КЗ можуть стати причиною підземних пожеж, що насамперед небезпечно для людей. За певних ситуацій КЗ призводять до порушення безпечних умов експлуатації шахтного електроустаткування. Захист від струмів КЗ – один з основних засобів створення вибухо- та пожежобезпеки від електроустаткування.

У шахтних електричних мережах можуть статися однофазні замикання на землю та міжфазні КЗ. З урахуванням особливої небезпеки цих замикань “Правила безпеки в підземних виробках шахт” допускають застосування трансформаторів тільки з незаземленою нейтраллю. Заземлення нульової точки дозволяється лише для мереж напругою 0,4 кВ, та й то на поверхні шахт. Відповідно до зазначених Правил максимально допустима потужність КЗ на шинах центральної підземної підстанції не повинна перевищувати 50 % від потужності вимикання, але і не більше 100 МВ·А.

У підземних шахтних мережах замикання фази на землю або корпус електроприймача (навіть при малих струмах витоку) пов’язане з небезпекою ураження оточуючих електричним струмом. Тому ці замикання, на відміну від мереж загальнопромислових підприємств, негайно вимикають спеціальним захистом від витоків струму. Наявність такого захисту дає змогу практично усувати перехід однофазних замикань у двофазні або двофазні КЗ на землю. У струмі замикання на землю практично завжди містяться складові з частотами, що перевищують промислову частоту. В момент замикання на землю виникає перехідний процес, в якому можна виділити дві стадії. Початкова стадія характеризується розповсюдженням електромагнітних хвиль в обидві сторони по мережі від місця пошкодження. Тут частота складових перехідного процесу велика (до сотні кілогерц), а тривалість процесу мала. В другій стадії характер перехідного процесу приблизно такий же, як і в контурах із зосередженими параметрами. Орієнтовно перехідний процес можна оцінити за схемою заміщення для нульової послідовності, на яку подається напруга збурення  $u_0(t)$ . Криві на рис. 4 відбивають характер зміни струму замикання та напруги в мережі. Перехідний процес триває не більше 10 мс з частотою сотні герц. Найбільш ефективний перехідний процес спостерігається (рис. 4,а), якщо початкове значення напруги  $u_0(0)$  в усталеному режимі відповідає максимальному значенню напруги на результуючій ємності  $U_C$  (рис. 4,б). Це можливе при замиканні на землю в момент максимального значення фазної напруги пошкодженої фази (досить розповсюджений випадок).

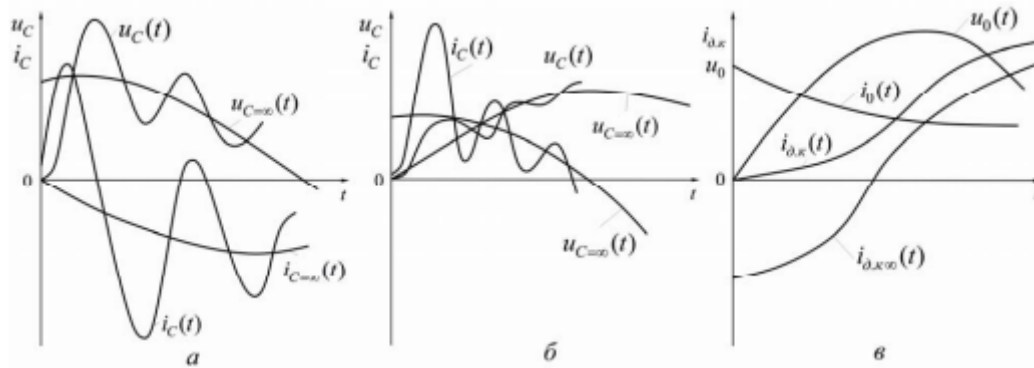


Рис. 4. Криві струму та напруги перехідного процесу при напрузі збурення  $u_0(t)$

Якщо початкове значення  $u_0(0)$  відповідає переходу напруги  $u_c(0)$  через нульове значення, то струми перехідного процесу зменшуються (рис. 4,б). Амплітуди струмів перехідного процесу можуть в десятки разів перевищувати усталені струми замикання на землю. Відношення амплітуд можна вважати приблизно рівним відношенню частоти перехідного процесу до промислової частоти.

У мережах з компенсацією ємнісних струмів дугогасильна котушка практично не впливає на високочастотні складові перехідного процесу (рис. 4,в). Тут частота настроювання близька до 50 Гц при достатньо точній компенсації ємнісного струму. Дугогасильна котушка може викликати появу аперіодичної складової струму замикання на землю (постійна часу контуру залежить від добротності котушки та амплітуди струму, яка не перевищує номінального значення). Тому результуючий струм замикання на землю в цих мережах, окрім високочастотних, містить аперіодичну складову.

Як установлено та підкріплено дослідями, вищі гармоніки практично завжди присутні в струмі замикання і складають 5...15 % від значення струму основної гармоніки. Гармонічний склад струму замикання залежить від виду мережі, умов замикання і може змінюватися в широких межах.

### 3. Короткі замикання в мережах струму підвищеної частоти

Електромагнітні процеси в мережах струму підвищеної частоти (до 10000 Гц) при аварійних режимах розраховують за тих же умов та формул, що і в мережах промислової частоти (50 Гц). На підвищених частотах помітний прояв поверхневого ефекту та ефекту близькості. Тому струм у перерізі провідника розподіляється нерівномірно. Глибина проникнення струму в провідник з немагнітного матеріалу визначається за виразом

$$\Delta = 5030\sqrt{\rho / f},$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника, Ом·см;  $f$  – частота струму, Гц.



Значення зменшується із зростанням частоти та поперечного перерізу провідника. Активний та індуктивний опори провідника при цьому зростають, що викликає зменшення допустимого тривалого струму навантаження і збільшення втрат напруги. В провідниках з перерізом  $10 \text{ мм}^2$  та менше коефіцієнт поверхневого ефекту незначний і при розрахунках мереж струму підвищеної частоти на нього не зважають.

Ефект близькості визначає перерозподіл змінного струму в провіднику з наближенням до нього другого провідника зі струмом або провідника з наведеним струмом. Перерозподіл існує при будь-якій конфігурації перерізу суцільного провідника.

З підвищенням частоти розміри та маса магнітопроводу електричних машин і трансформаторів зменшуються. Електричні мережі струму підвищеної частоти більш металомісткі, аніж мережі струму промислової частоти в зв'язку з тим, що перерізи провідників більші. У цілому розміри електроустановок струму підвищеної частоти менші за аналогічні установки промислової частоти.

Основне завдання розрахунку та аналізу аварійних режимів у мережах підвищеної частоти – визначення їх параметрів при міжфазних та однофазних КЗ на корпус (землю), перевантаженнях, зниженнях напруги або ж під час її короткочасних вимикань. Електричні мережі струму підвищеної частоти утворюють з використанням шинопроводів та кабелів, а також з ізольованих провідників, прокладених відкрито чи в трубах. Провідники для них звичайно вибирають за припустимих значень нагрівання та втрат напруги, а потім перевіряють за струмом КЗ.

Аварійні режими в мережах струму підвищеної частоти обчислюють з урахуванням відповідної схеми розподілу електричної енергії: радіальної, магістральної або магістрально-радіальної. Радіальна схема застосовується для окремих споживачів достатньо великої потужності (понад 20 кВт), якщо пункт живлення – приблизно в центрі цих навантажень. При магістральній схемі одна лінія-магістраль живить електроенергією підвищеної частоти кілька приймачів порівняно невеликої потужності (менше 20 кВт), приєднаних до неї в різних точках. За радіальної схеми використовують кабелі або провідники у трубах, а за магістральної – струмоводи.