

Лекція 6

(2 години)

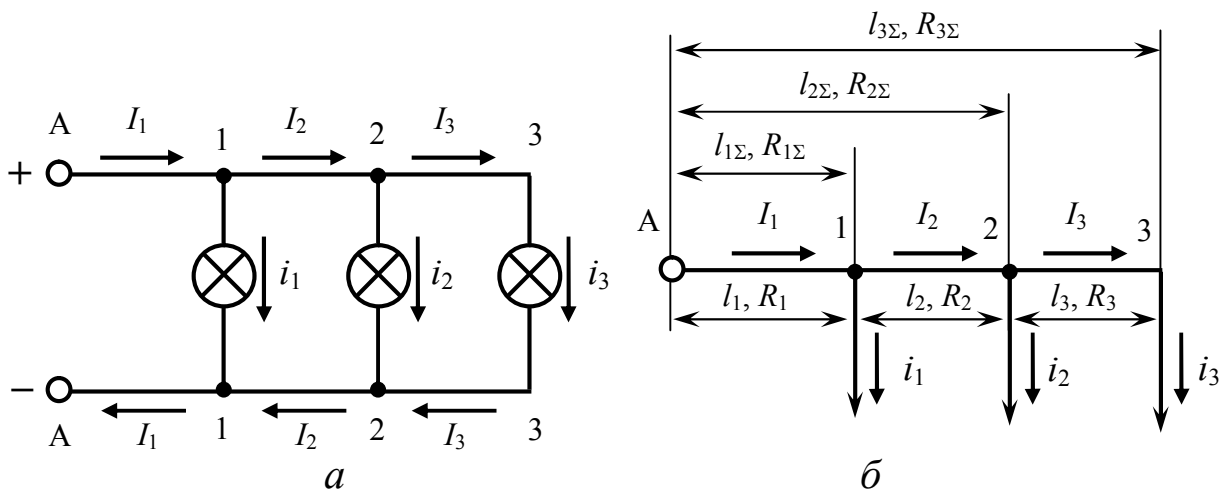
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ВТРАТОЮ НАПРУГИ

6.1 Розрахунок ліній постійного струму

Електричний струм, протікаючи по провіднику, створює в ньому спад (падіння) напруги. Внаслідок цього напруга в кінці лінії відрізняється від напруги на початку лінії і здебільшого нижча від неї. Крім того, вона змінюється разом із зміною навантаження. Проводи лінії електропередачі вибирають таким чином, щоб спад напруги в них не виходив за встановлені межі і напруга в кінці лінії підтримувалась на необхідному для споживачів рівні.

Електричний розрахунок проводів зводиться до визначення в них спаду напруги, якщо переріз проводів заданий і, навпаки, до визначення перерізу проводів при відповідному допустимому (заданому) спаді напруги.

На рисунку 6.1, *a* зображена лінія постійного струму із трьома навантаженнями.



a – розгорнута схема; *б* – однолінійна схема

Рисунок 6.1 – Розрахункова схема лінії постійного струму

У зв'язку з тим, що прямий і зворотний проводи такої лінії виконують однаковим перерізом, можна замінити її однолінійним зображенням (рисунок 6.1, б). Такий метод застосовують і в трифазних симетричних мережах.

Приймаємо наступні позначення:

i_1, i_2, i_3 – струми навантаження, А;

I_1, I_2, I_3 – струми в лінії (лінійні струми), А;

l_1, l_2, l_3 – довжина окремих ділянок лінії, м;

$l_{1\Sigma}, l_{2\Sigma}, l_{3\Sigma}$ – сумарна довжина від навантаження до початку лінії, м;

R_1, R_2, R_3 – опори окремих ділянок лінії, Ом;

$R_{1\Sigma}, R_{2\Sigma}, R_{3\Sigma}$ – сумарні опори від навантаження до початку лінії, Ом;

Очевидно, що

$$I_1 = i_1 + i_2 + i_3; \quad I_2 = i_2 + i_3; \quad I_3 = i_3.$$

З рисунку 6.1, б також видно, що

$$l_{1\Sigma} = l_1; \quad l_{2\Sigma} = l_1 + l_2; \quad l_{3\Sigma} = l_1 + l_2 + l_3.$$

$$R_{1\Sigma} = R_1; \quad R_{2\Sigma} = R_1 + R_2; \quad R_{3\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Спад напруги ΔU , В, дорівнює різниці напруг на початку і в кінці лінії. Його можна знайти за законом Ома:

$$\Delta U = U_A - U_3 = 2I_1R_1 + 2I_2R_2 + 2I_3R_3. \quad (6.1)$$

Як видно із виразу (6.1) спад напруги подвоюється, оскільки він має місце в прямому і в зворотному проводах. У скороченому вигляді вираз (6.1) можна записати як:

$$\Delta U = 2 \sum I_i R_i. \quad (6.2)$$

Якщо струми в лінії замінити струмами навантаження, то вираз (6.1) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
\Delta U &= 2[(i_1 + i_2 + i_3)R_1 + (i_2 + i_3)R_2 + i_3R_3] = \\
&= 2(i_1R_1 + i_2R_1 + i_3R_1 + i_2R_2 + i_3R_2 + i_3R_3) = \\
&= 2[i_1R_1 + (R_1 + R_2)i_2 + (R_1 + R_2 + R_3)i_3] = \\
&= 2(i_1R_{1\Sigma} + i_2R_{2\Sigma} + i_3R_{3\Sigma}),
\end{aligned}$$

або в загальному вигляді:

$$\Delta U = 2 \sum i_i R_{i\Sigma}. \quad (6.3)$$

Якщо лінія виконана проводами одного перерізу, то

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot F}, \quad (6.4)$$

$$R_{\Sigma} = \frac{l_{\Sigma}}{\gamma \cdot F}, \quad (6.5)$$

де γ – питома провідність матеріалу проводу, См/м;
 F – переріз проводу, мм².

Тоді спад напруги в лінії:

$$\Delta U = \frac{2}{\gamma \cdot F} \sum I_i \cdot l_i, \quad (6.6)$$

або

$$\Delta U = \frac{2}{\gamma \cdot F} \sum i_i \cdot l_{i\Sigma}. \quad (6.7)$$

Якщо задано допустимий спад напруги в лінії $\Delta U_{\text{дон}}$, В, то переріз проводів знаходять за виразами:

$$F = \frac{2}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}}} \sum I_i \cdot l_i, \quad (6.8)$$

$$F = \frac{2}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}}} \sum i_i \cdot l_{i\Sigma}. \quad (6.9)$$

В ряді випадків у вихідних даних навантаження лінії і споживачів можуть бути виражені потужностями.

Позначимо: через p , Вт, потужність навантаження; через P , Вт, потужність лінії; через U_n , В, номінальну напругу мережі.

Наближено можна вважати, що

$$i_1 = \frac{P_1}{U_n}, \quad i_2 = \frac{P_2}{U_n}, \quad i_3 = \frac{P_3}{U_n};$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_n}, \quad I_2 = \frac{P_2}{U_n}, \quad I_3 = \frac{P_3}{U_n}.$$

Підставивши ці значення у вирази (6.8) та (6.9), отримаємо:

$$F = \frac{2}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}} \cdot U_n} \sum P_i \cdot l_i, \quad (6.10)$$

$$F = \frac{2}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}} \cdot U_n} \sum p_i \cdot l_{i\Sigma}. \quad (6.11)$$

Якщо спад напруги виразити не у вольтах, а у процентах від номінальної напруги, тобто

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100,$$

тоді вирази (6.8) та (6.9) можна перетворити на наступні:

$$F = \frac{200}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}}\% \cdot U_n} \sum I_i \cdot l_i, \quad (6.12)$$

$$F = \frac{200}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}}\% \cdot U_n} \sum i_i \cdot l_{i\Sigma}. \quad (6.13)$$

Аналогічно можна перетворити і вирази (6.10) та (6.11):

$$F = \frac{200}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}}\% \cdot U_n^2} \sum P_i \cdot l_i, \quad (6.14)$$

$$F = \frac{200}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{дон}}\% \cdot U_n^2} \sum p_i \cdot l_{i\Sigma}. \quad (6.15)$$

Спад напруги можна розглядати не лише як суму його активної і реактивної складових. Опустивши із точки c перпендикуляр на напрямок вектора $\dot{U}_{\phi 1}$ ($0 a$), із трикутника $a-e-c$ матимемо:

$$\dot{I} \cdot \underline{Z} = ac = \sqrt{(ae)^2 + (ec)^2}. \quad (6.19)$$

Відрізок $a e$ називають **поздовжньою складовою спаду напруги** і позначають ΔU_{ϕ} .

Відрізок $e c$ називають **поперечною складовою спаду напруги** і позначають δU_{ϕ} .

Опустивши перпендикуляр з точки b на вектор $\dot{U}_{\phi 1}$ ($0 a$), і побудувавши прямокутник $e g b f$ (рисунок 6.3), матимемо:

$$\Delta U_{\phi} = af + fe = af + bg = I \cdot r \cdot \cos \varphi + I \cdot x \cdot \sin \varphi. \quad (6.20)$$

$$\delta U_{\phi} = ec = gc - bf = I \cdot x \cdot \cos \varphi - I \cdot r \cdot \sin \varphi. \quad (6.21)$$

Міжфазна (лінійна) складова напруги більша від фазної в $\sqrt{3}$ разів, тому для поздовжньої складової лінійної напруги можна записати:

$$\Delta U = \sqrt{3} \Delta U_{\phi} = \sqrt{3} (I \cdot r \cdot \cos \varphi + I \cdot x \cdot \sin \varphi), \quad (6.22)$$

а для поперечної складової лінійної напруги:

$$\delta U = \sqrt{3} \delta U_{\phi} = \sqrt{3} (I \cdot x \cdot \cos \varphi - I \cdot r \cdot \sin \varphi), \quad (6.23)$$

або

$$\Delta U = \sqrt{3} (I_a \cdot r + I_p \cdot x), \quad (6.24)$$

$$\delta U = \sqrt{3} (I_a \cdot x - I_p \cdot r). \quad (6.25)$$

Якщо навантаження задано у вигляді потужності, тоді:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_n}; \quad I_a = \frac{P}{\sqrt{3}U_n}; \quad I_p = \frac{Q}{\sqrt{3}U_n}.$$

Увівши значення потужності в рівняння (6.24) та (6.25), матимемо:

$$\Delta U = \sqrt{3} \left(\frac{P}{\sqrt{3}U_n} \cdot r + \frac{Q}{\sqrt{3}U_n} \cdot x \right) = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_n}, \quad (6.26)$$

$$\delta U = \sqrt{3} \left(\frac{P}{\sqrt{3}U_n} \cdot x - \frac{Q}{\sqrt{3}U_n} \cdot r \right) = \frac{P \cdot x - Q \cdot r}{U_n}. \quad (6.27)$$

Якщо магістраль живить кількох споживачів, то рівняння (6.24) та (6.25) приймуть вигляд:

$$\Delta U = \sqrt{3} \sum (I_{ai} \cdot r_i + I_{pi} \cdot x_i), \quad (6.28)$$

$$\delta U = \sum \sqrt{3} (I_{ai} \cdot x_i - I_{pi} \cdot r_i), \quad (6.29)$$

а рівняння (6.26) та (6.27) приймуть наступний вигляд:

$$\Delta U = \frac{\sum P_i \cdot r_i + \sum Q_i \cdot x_i}{U_n}; \quad (6.30)$$

$$\delta U = \frac{\sum P_i \cdot x_i - \sum Q_i \cdot r_i}{U_n}. \quad (6.31)$$

Для споживачів значення має не фаза, а абсолютне значення напруги, тому мережі розраховують не за спадом, а за втратою напруги.

З трикутника θ e c (рисунок 6.3) можна записати, що

$$U_{\phi 2} = \sqrt{(U_{\phi 1} - \Delta U_{\phi})^2 + (\delta U_{\phi})^2}. \quad (6.32)$$

Втрата напруги:

$$ad = U_{\phi 1} - U_{\phi 2} = U_{\phi 1} - \sqrt{(U_{\phi 1} - \Delta U_{\phi})^2 + (\delta U_{\phi})^2}. \quad (6.33)$$

Якщо відома напруга в кінці лінії $U_{\phi 2}$ та спад напруги в лінії, то можна знайти напругу на початку лінії $U_{\phi 1}$. Вона дорівнює геометричній сумі напруги в кінці лінії і спаду напруги на ній:

$$U_{\phi 1} = \sqrt{(U_{\phi 2} + \Delta U_{\phi})^2 + (\delta U_{\phi})^2}. \quad (6.34)$$

Втрату напруги можна визначити аналогічно рівнянню (6.33):

$$U_{\phi 1} - U_{\phi 2} = \sqrt{(U_{\phi 2} + \Delta U_{\phi})^2 + (\delta U_{\phi})^2} - U_{\phi 2} \quad (6.35)$$

З векторної діаграми (рисунок 6.3) видно, що за значенням втрата напруги відрізняється від поздовжньої складової спаду напруги на незначний за довжиною відрізок ea . Тому, для практичних розрахунків в електричних мережах напругою до 35 кВ включно, втрату напруги прирівнюють поздовжній складовій спаду напруги:

$$da = U_{\phi 1} - U_{\phi 2} \approx ea = \Delta U_{\phi}. \quad (6.36)$$

Похибка від такого припущення не перебільшує 5 %.

Лінійна втрата напруги при цьому, якщо $\varphi_2 = \varphi$, дорівнює:

$$\Delta U = \sqrt{3} (I \cdot r \cdot \cos \varphi + I \cdot x \cdot \sin \varphi), \quad (6.37)$$

або

$$\Delta U = \sqrt{3} (I_a \cdot r + I_p \cdot x), \quad (6.38)$$

або

$$\Delta U = \frac{\sum P \cdot r + \sum Q \cdot x}{U_n}. \quad (6.39)$$

6.3 Розрахунок електричних мереж трифазного струму при сталому перерізі проводів магістралі

Основним завданням при розрахунках мереж є визначення перерізу проводів за заданою допустимою втратою напруги. В свою чергу, допустиму втрату напруги в мережі визначають виходячи із допустимих значень відхилення напруги у споживачів.

При змінному струмі, на відміну від постійного, в мережі окрім активного опору необхідно також враховувати і реактивний

опір. Реактивний і активний опір проводів по різному залежать від зміни перерізу проводів. Так, наприклад, із збільшенням перерізу алюмінієвого проводу від 16 мм² до 95 мм² активний опір зменшиться в 5,8 разів, а індуктивний – лише в 1,2 рази. Тому для визначення перерізу проводів використовують метод розподілу допустимої втрати напруги $\Delta U_{\text{дон}}$ на реактивну та на активну складові (метод Степанова).

Згідно із (6.37):

$$\Delta U_{\text{дон}} = \sqrt{3} I \cdot r \cdot \cos \varphi + \sqrt{3} I \cdot x \cdot \sin \varphi ,$$

або

$$\Delta U_{\text{дон}} = \Delta U_{a \text{ дон}} + \Delta U_{p \text{ дон}} , \quad (6.40)$$

де $\Delta U_{a \text{ дон}}$ – складова допустимої втрати напруги в активному опорі;

$\Delta U_{p \text{ дон}}$ – складова допустимої втрати напруги в реактивному опорі.

Відомо, що реактивний (індуктивний) опір одного кілометра проводу із кольорового металу мало змінюється із зміною перерізу і становить для повітряних ліній у середньому 0,35...0,45 Ом/км. Тому ще до визначення перерізу проводу, підставивши значення x_0 можна обчислити наближене значення реактивної складової допустимої втрати напруги:

$$\Delta U_{p \text{ дон}} = \sqrt{3} x_0 \sum I_{pi} \cdot l_i . \quad (6.41)$$

або

$$\Delta U_{p \text{ дон}} = x_0 \frac{\sum Q_i \cdot l_i}{U_n} . \quad (6.42)$$

Віднявши від допустимої втрати напруги її реактивну складову, матимемо активну складову втрати напруги:

$$\Delta U_{a \text{ дон}} = \Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_{p \text{ дон}} . \quad (6.43)$$

Згідно із (6.38):

$$\Delta U_{a \text{ don}} = \sqrt{3} \sum I_{ai} \cdot r_i. \quad (6.44)$$

Підставивши $r = \frac{l}{\gamma F}$ у вираз (6.44), при сталому перерізі проводів, отримаємо:

$$\Delta U_{a \text{ don}} = \frac{\sqrt{3}}{\gamma F} \sum I_{ai} \cdot l_i, \quad (6.45)$$

або через потужність:

$$\Delta U_{a \text{ don}} = \frac{\sum P_i \cdot l_i}{\gamma F U_n}. \quad (6.46)$$

Звідси переріз проводу:

$$F = \frac{\sqrt{3} \sum I_{ai} \cdot l_i}{\gamma \cdot \Delta U_{a \text{ don}}}, \quad (6.47)$$

або

$$F = \frac{\sum P_i \cdot l_i}{\gamma U_n \cdot \Delta U_{a \text{ don}}}. \quad (6.48)$$

Порядок розрахунку електричних мереж за допустимою втратою напруги при сталому перерізі проводів наступний:

- 1) задаються середнім індуктивним опором одного кілометра проводу ($x_0 = 0,35 \dots 0,45$ Ом/км);
- 1) визначають реактивну складову втрати напруги ΔU_p за виразами (6.41) або (6.42);
- 2) користуючись рівнянням (6.43), знаходять активну складову допустимої втрати напруги в магістралі $\Delta U_{a \text{ don}}$;
- 3) за рівнянням (6.47) або (6.48) визначають розрахунковий переріз проводу;
- 4) вибирають за таблицями відповідний стандартний переріз проводу;

5) знаходять активний і реактивний опір для одного кілометра проводу заданого перерізу і за рівнянням (6.37), (6.38) або (6.39) визначають дійсну втрату напруги в мережі. Якщо вона більша допустимої то необхідно збільшити переріз проводу на ділянці лінії.

6.4 Розрахунок розгалужених електричних мереж змінного струму

Електропостачання споживчих трансформаторних підстанцій здійснюється здебільшого розгалуженими повітряними лініями 6...10 кВ (рисунок 6.4).

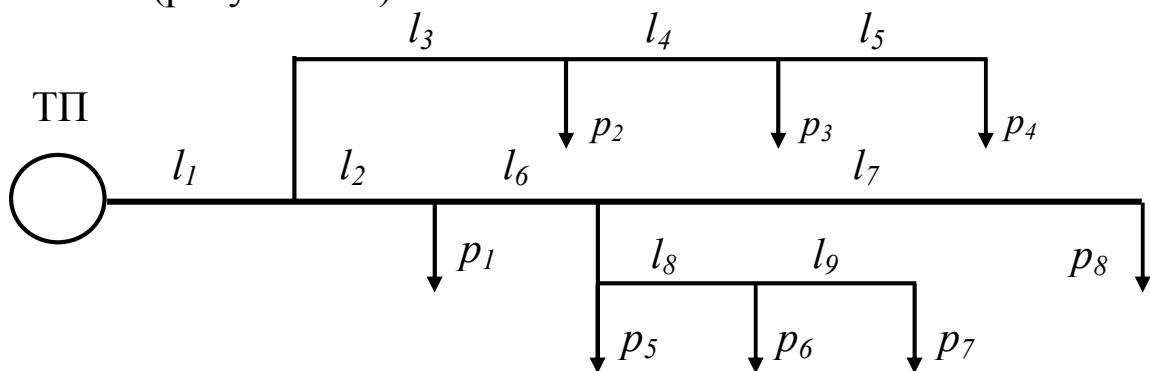


Рисунок 6.4 – Розгалужена електрична мережа

Загальний порядок розрахунку розгалужених електричних мереж за допустимою втратою напруги аналогічний розрахунку не розгалужених мереж при сталому перерізу проводів. Відмінність полягає у тому, що спочатку вибирають переріз проводів основної магістралі, а потім – переріз проводів відгалужень.

Порядок розрахунку розгалужених мереж:

1) визначають основну магістраль мережі; після головної ділянки магістраль пройде по відгалуженню, для якого сума моментів навантаження ($\sum P_i \cdot l_i$, $\sum I_i \cdot l_i$ або $\sum S_i \cdot l_i$) буде найбільшою;

2) задаються середнім індуктивним опором одного кілометра проводу ($x_0 = 0,35 \dots 0,45$ Ом/км);

3) визначають реактивну складову втрати напруги ΔU_p магістралі за виразами (6.41) або (6.42);

4) користуючись рівнянням (6.43), знаходять активну складову допустимої втрати напруги в магістралі $\Delta U_{a. доп}$;

5) за рівнянням (6.47) або (6.48) визначають розрахунковий переріз проводу магістралі;

6) вибирають за таблицями стандартний переріз проводу;

7) знаходять його активний і реактивний опори для одного кілометра і за рівнянням (6.37), (6.38) або (6.39) визначають дійсну втрату напруги в мережі. Якщо вона більша допустимої то необхідно збільшити переріз проводу;

8) обчислюють уточнену втрату напруги в магістралі до відгалуження і знаходять допустиму втрату напруги, що залишилася:

$$\Delta U_{доп\ зал} = \Delta U_{доп} - \Delta U_{доп\ гол};$$

9) аналогічно до розрахунку на магістралі, за допустимою втратою напруги у відгалуженні, знаходять переріз його проводів;

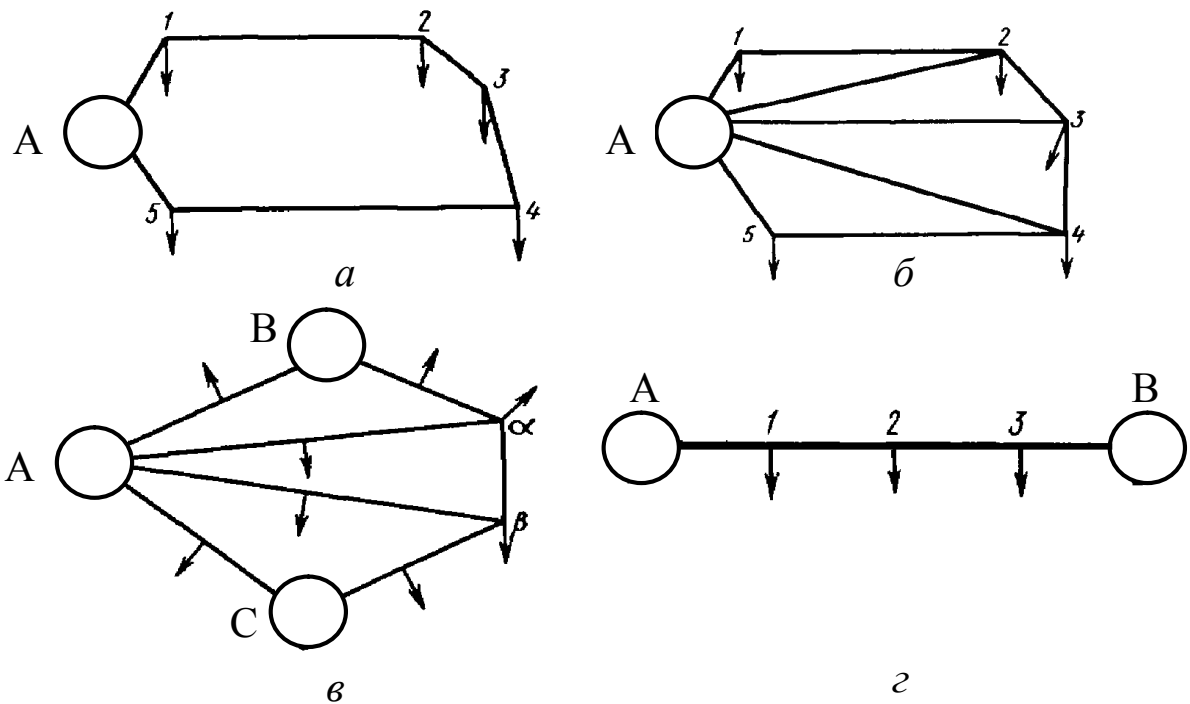
10) вибрані проводи перевіряють за допустимим нагріванням.

6.5 Розрахунок замкнених мереж змінного струму

На даний час переважають радіальні електричні мережі. Спорудження радіальних мереж потребує меншої витрати коштів і матеріалів. Проте у них є істотний недолік. При пошкодженні лінії, особливо на її початку, припиняється електропостачання всіх споживачів, що приєднані до неї.

Електропостачання відповідальних споживачів має бути надійним. Такій вимозі відповідають замкнені електричні мережі.

Замкненою називають електричну мережу, магістральні лінії якої отримують живлення не менше ніж із двох сторін. У такій мережі (рисунок 6.5) обрив магістралі в будь-якому місці не порушує електропостачання усіх споживачів.



a, *б* – проста і складна з одним джерелом живлення; *в* – складна з декількома джерелами живлення; *г* – лінія з двостороннім живленням; А, В і С – джерела живлення; α і β – вузлові точки

Рисунок 6.5 – Схеми замкнених електричних мереж

Якщо в мережі будуть проведені додаткові внутрішні лінії А-2, А-3 і А-4 (рисунок 6.5, *б*), то точки 2...4 отримують живлення з трьох сторін і їх називають вузловими або вузлами. У цій мережі при обриві лінії на будь-якій з ділянок електропостачання всіх споживачів надійніше, ніж в простій замкненій мережі (рисунок 6.5, *а*).

Мережі, зображені на рисунку 6.5, *а* і *б*, забезпечені одним джерелом живлення А. При виході його з ладу припиняється електропостачання всіх споживачів цих мереж. Для підвищення надійності електропостачання потрібно збільшити число джерел живлення в мережі.

Проста замкнена мережа з двома джерелами живлення А і В (рисунок 6.5, *г*) називається лінією з двостороннім живленням. У такій лінії обрив проводів і навіть вихід з ладу одного з джерел живлення не порушує електропостачання всіх або більшої частини споживачів електроенергії.

Складна замкнена мережа (рисунок 6.5, *в*) з декількома джерелами живлення забезпечує найбільш високу надійність електропостачання.

Недоліки замкнених мереж полягають в значно більшій їх вартості і витраті матеріалів. Крім того, захист замкнених мереж від коротких замикань складніший, ніж захист радіальних. Цим і пояснюється те, що замкнені мережі в сільському господарстві застосовують недостатньо. Їх використовують у вигляді ліній з двостороннім живленням (рисунок 6.5, з).

Лінії із двостороннім живленням. Припустимо, що є лінія (рисунок 6.6) з двома джерелами живлення А і В і навантаженнями i_1, i_2, i_3 . Позначимо струми, що протікають по ділянках, опори і довжини ділянок відповідними індексами. Наприклад, на ділянці 1-2 струм I_{12} опір Z_{12} і довжина l_{12} . Лінія виконана проводами з кольорового металу.

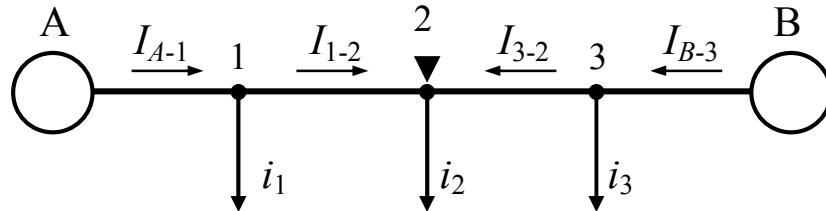


Рисунок 6.6 – Схема розподілу струмів в лінії з двостороннім живленням

У загальному випадку напруги джерел живлення не рівні, тобто $\dot{U}_A \neq \dot{U}_B$. Припустимо, що точка 2 отримує живлення з двох сторін. Її називають точкою **струмоподілу** і позначають значком трикутника.

Визначимо значення струмів \dot{I}_{A-1} і \dot{I}_{B-3} джерел живлення.

Спад (падіння) напруги на ділянках А-2 і В-2:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_2 = \sqrt{3}(\dot{I}_{A-1} \underline{Z}_{A-1} + \dot{I}_{1-2} \underline{Z}_{1-2}); \quad (6.49)$$

$$\dot{U}_B - \dot{U}_2 = \sqrt{3}(\dot{I}_{B-3} \underline{Z}_{B-3} + \dot{I}_{3-2} \underline{Z}_{3-2}). \quad (6.50)$$

Віднімемо від першого рівняння друге:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3}(\dot{I}_{A-1} \underline{Z}_{A-1} + \dot{I}_{1-2} \underline{Z}_{1-2} - \dot{I}_{B-3} \underline{Z}_{B-3} - \dot{I}_{3-2} \underline{Z}_{3-2}). \quad (6.51)$$

Сума струмів джерел живлення дорівнює сумі струмів навантажень:

$$\dot{I}_{A-1} + \dot{I}_{B-3} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3. \quad (6.52)$$

Використовуючи вираз (6.52) і перший закон Кірхгофа, виразимо всі лінійні струми через струм \dot{I}_{A-1} і струми навантажень:

$$\dot{I}_{B-3} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3 - \dot{I}_{A-1};$$

$$\dot{I}_{3-2} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 - \dot{I}_{A-1};$$

$$\dot{I}_{1-2} = \dot{I}_{A-1} - \dot{i}_1.$$

Підставляючи ці значення у вираз (6.51), отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3}} &= \dot{I}_{A-1} \underline{Z}_{A-1} + (\dot{I}_{A-1} - \dot{i}_1) \underline{Z}_{1-2} - \\ &- (\dot{I}_{A-1} - \dot{i}_1 - \dot{i}_2 - \dot{i}_3) \underline{Z}_{B-3} - (\dot{I}_{A-1} - \dot{i}_1 - \dot{i}_2) \underline{Z}_{3-2}, \end{aligned}$$

або після перетворення:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3}} &= \dot{I}_{A-1} (\underline{Z}_{A-1} + \underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{B-3} + \underline{Z}_{3-2}) - \\ &- \dot{i}_1 (\underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{B-3} + \underline{Z}_{3-2}) - \dot{i}_2 (\underline{Z}_{B-3} + \underline{Z}_{3-2}) - \dot{i}_3 \underline{Z}_{B-3}. \end{aligned}$$

В свою чергу:

$$\underline{Z}_{A-1} + \underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{B-3} + \underline{Z}_{3-2} = \underline{Z}_{A-B};$$

$$\underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{B-3} + \underline{Z}_{3-2} = \underline{Z}_{1-B};$$

$$\underline{Z}_{B-3} + \underline{Z}_{3-2} = \underline{Z}_{2-B};$$

$$\underline{Z}_{B-3} = \underline{Z}_{3-B}.$$

Тоді

$$\frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3}} = \dot{I}_{A-1} \underline{Z}_{A-B} - \dot{i}_1 \underline{Z}_{1-B} - \dot{i}_2 \underline{Z}_{2-B} - \dot{i}_3 \underline{Z}_{B-3}.$$

Останні три члени рівняння можна виразити так:

$$\dot{i}_1 \underline{Z}_{1-B} - \dot{i}_2 \underline{Z}_{2-B} - \dot{i}_3 \underline{Z}_{B-3} = \sum \dot{i}_i \underline{Z}_{i-B}.$$

Значення струмів \dot{I}_{A-1} і \dot{I}_{B-3} джерел живлення А і В:

$$\dot{I}_{A-1} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3} \underline{Z}_{A-B}} + \frac{\sum \dot{i}_i \underline{Z}_{i-B}}{\underline{Z}_{A-B}}. \quad (6.53)$$

$$\dot{I}_{B-3} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_A}{\sqrt{3} \underline{Z}_{A-B}} + \frac{\sum \dot{i}_i \underline{Z}_{i-A}}{\underline{Z}_{A-B}}. \quad (6.54)$$

Першу складову струму джерела живлення (вирази (6.53) та (6.54)) називають **зрівняльним струмом**. Вона обумовлена різницею напруги пунктів (джерел) живлення і зсувом фаз між цією напругою. Друга складова обумовлена лише навантаженням, її називають **лінійним струмом навантаження**.

Значення повних потужностей \dot{S}_{A-1} і \dot{S}_{B-3} джерел живлення А і В:

$$\dot{S}_{A-1} = \frac{U_n(\dot{U}_A - \dot{U}_B)}{\underline{Z}_{A-B}} + \frac{\sum \dot{S}_i \underline{Z}_{i-B}}{\underline{Z}_{A-B}}; \quad (6.55)$$

$$\dot{S}_{B-3} = \frac{U_n(\dot{U}_B - \dot{U}_A)}{\underline{Z}_{A-B}} + \frac{\sum \dot{S}_i \underline{Z}_{i-A}}{\underline{Z}_{A-B}}. \quad (6.56)$$

де U_n – номінальна напруга мережі;

S_i – повна потужність навантаження в i -й точці.

Окремі випадки застосування формул (6.53)...(6.56):

1) напруга джерел живлення рівна, тобто $\dot{U}_A = \dot{U}_B$. В цьому випадку зрівняльні струми дорівнюють нулю, і для визначення струмів від обох джерел живлення використовують лише другі члени правої частини рівнянь (6.53)...(6.56):

$$\dot{I}_{A-1} = \frac{\sum \dot{i}_i \underline{Z}_{i-B}}{\underline{Z}_{A-B}}; \quad (6.57) \quad \dot{I}_{B-3} = \frac{\sum \dot{i}_i \underline{Z}_{i-A}}{\underline{Z}_{A-B}}. \quad (6.58)$$

$$\dot{S}_{A-1} = \frac{\sum \dot{S}_i \underline{Z}_{i-B}}{\underline{Z}_{A-B}}; \quad (6.59) \quad \dot{S}_{B-3} = \frac{\sum \dot{S}_i \underline{Z}_{i-A}}{\underline{Z}_{A-B}}; \quad (6.60)$$

2) напруга джерел живлення однакова $\dot{U}_A = \dot{U}_B$ і, крім того, вся лінія виконана проводом однакового перерізу, матеріалу і конструкції:

$$\dot{I}_{A-1} = \frac{\sum \dot{i}_i l_{i-B}}{l_{A-B}}; \quad (6.61) \quad \dot{I}_{B-3} = \frac{\sum \dot{i}_i l_{i-A}}{l_{A-B}}. \quad (6.62)$$

$$\underline{\dot{S}}_{A-1} = \frac{\sum \dot{S}_i l_{i-B}}{l_{A-B}}; \quad (6.63) \quad \underline{\dot{S}}_{B-3} = \frac{\sum \dot{S}_i l_{i-A}}{l_{A-B}}. \quad (6.64)$$

Розглянемо порядок визначення перерізу проводів в лінії з двостороннім живленням з проводами з кольорових металів:

1) задаються перерізом проводів лінії або визначають їх за аварійними режимами (одне джерело живлення);

2) знаходять значення струмів або потужностей джерел живлення за виразами (6.53)...(6.64);

3) визначають точки струмоподілу окремо для активних і реактивних струмів (потужностей). Точки розподілу активних і реактивних струмів у загальному випадку можуть не збігатися одна з одною;

4) «розрізають» лінію в точці розділу активних струмів і визначають найбільшу втрату напруги, як для радіальної мережі;

5) визначають втрату напруги в лінії для найгіршого аварійного випадку – відключення лінії в одному з її кінців. При аварії, допускається збільшення відхилення напруги на 5 %.

Якщо втрати напруги виходять за межі допустимих, то переріз проводу лінії змінюють і розрахунок повторюють.

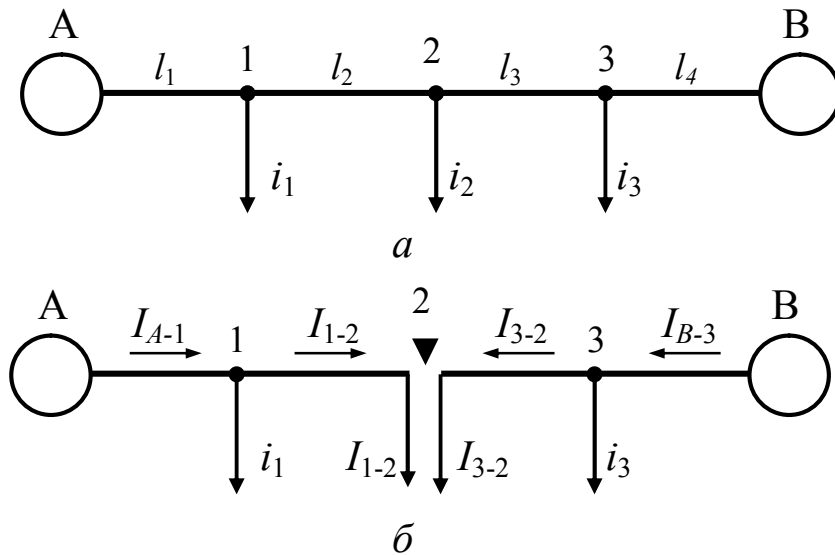
Переріз проводів з кольорового металу лінії з двостороннім живленням по заданій допустимій втраті напруги визначають наступним чином:

1) в більшості випадків лінія має однакову конструкцію по всій довжині (повітряна або кабельна) і виконана проводом одного і того ж перерізу. Напруга джерел живлення однакова;

2) нехай задані відстані і навантаження лінії із двостороннім живленням (рисунок 6.7, а);

3) за виразами (6.61) та (6.62) знаходять струми, що течуть з пунктів живлення А і В:

$$\dot{I}_{A-1} = \frac{\sum \dot{i}_i l_{i-B}}{l_{A-B}}; \quad \dot{I}_{B-3} = \frac{\sum \dot{i}_i l_{i-A}}{l_{A-B}};$$



a – лінія з двостороннім живленням;
б – дві лінії із одностороннім живленням

Рисунок 6.7 – Визначення перерізу лінії із двостороннім живленням (провід одного перерізу по всій довжині)

4) наносять розподіл струмів на схему лінії і знаходять точку струмоподілу, наприклад точка 2 (рисунок 6.7, б). «Розрізають» лінію в точці струмоподілу, маючи на увазі, що

$$\dot{i}_2 = \dot{I}_{1-2} + \dot{I}_{3-2};$$

5) отримують дві лінії з одностороннім живленням. Розраховують їх як магістралі з постійним перерізом, тобто задаються питомим індуктивним опором і знаходять складову втрати напруги в реактивних опорах:

$$\Delta U_{p \text{ don}} = \sqrt{3} x_0 \sum I_{pi} \cdot l_i;$$

6) визначають складову втрати напруги в активних опорах:

$$\Delta U_{a \cdot \text{don}} = \Delta U_{\text{don}} - \Delta U_{p \cdot \text{don}};$$

7) переріз провода визначають за виразом:

$$F = \frac{\sqrt{3} \sum I_{ai} l_i}{\gamma \cdot \Delta U_{a \cdot \text{don}}}.$$

Запитання для самоконтролю

1. З якою метою виконують розрахунок електричних мереж за втратою напруги?
2. Як визначається спад напруги в лінії постійного струму?
3. Як визначається переріз проводів за допустимою втратою напруги лінії постійного струму?
4. Чому вектор напруги в кінці лінії змінного струму відрізняється від вектора напруги на початку лінії за значенням та за напрямом?
5. Що називається спадом (падінням) напруги?
6. Що називається втратою напруги?
7. Що таке поздовжня складова падіння напруги?
8. У яких випадках при розрахунках нехтують поперечною складовою втрати напруги?
9. Що називають активною та реактивною складовою спаду напруги в колах змінного струму?
10. Яка різниця між спадом і втратою напруги в лініях змінного струму?
11. В чому полягає метод Степанова, що застосовується для розрахунку мереж за втратою напруги?
12. Алгоритм розрахунку електричних мереж за втратою напруги при сталому перерізу проводів.
13. Алгоритм розрахунку розгалужених електричних мереж за втратою напруги.
14. Як визначається точка струмоподілу в лініях із двостороннім живленням?
15. Як визначається значення струмів (потужностей), що витікають із джерел живлення в лінії із двостороннім живленням?
16. Алгоритм визначення перерізу проводів в лінії з двостороннім живленням з проводами з кольорових металів.