

Лекція 5

(2 години)

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПУСТИМИМ НАГРІВАННЯМ

5.1 Допустиме навантаження на проводи та кабелі

При протіканні по проводу електричного струму в ньому виділяється теплота Q , Дж, яка згідно із законом Джоуля-Ленца дорівнює:

$$Q = I^2 \cdot r \cdot \tau, \quad (5.1)$$

де I – сила струму, що протікає по провіднику, А;

r – активний опір проводу, Ом;

τ – час протікання струму, год.

Провід нагрівається струмом, що протікає по ньому, до температури, при якій кількість теплоти, яку отримує провід дорівнює кількості теплоти, яка віддається його поверхнею у навколишнє середовище.

Втрати теплоти (охолодження) голими або ізольованими проводами та кабелями, що прокладені на повітрі відбуваються за рахунок таких фізичних явищ: конвекції (теплого руху повітря навколо проводу), променевого теплообміну та теплопровідності повітря.

У кабелів, які прокладені безпосередньо в землі відведення теплоти відбувається лише за рахунок теплопровідності ґрунту.

Для неізольованих проводів ліній електропередачі максимально допустима температура проводу t не повинна перевищувати 70°C . Це пояснюється необхідністю створення надійних контактних з'єднань. При підвищенні температури проводу прискорюються процеси окислення на його поверхні, що веде до збільшення опору в місці контакту (з'єднання), і як

наслідок, до збільшення теплоти, що виділяється в ньому. Температура в місці з'єднання зростає, прискорюється окислення і т. д. – до повного руйнування проводу в місці з'єднання.

Для неізольованих проводів, що прокладені всередині приміщень, максимально допустима температура проводу t також не повинна перевищувати 70°C . Це пояснюється необхідністю забезпечити пожежну безпеку та виключити неприємні та шкідливі запахи, що утворюються внаслідок сухої перегонки технологічного пилю, що осідає на проводи.

Тепловий процес в ізольованих проводах і кабелях проходить аналогічно до процесу в голих проводах, але ізоляція змінює умови охолодження проводу – вона створює додатковий тепловий опір, але при цьому збільшується поверхня охолодження.

Максимально допустима температура для ізольованих проводів з ізоляцією із різних матеріалів має наступні значення:

55°C – для проводів із звичайною гумовою ізоляцією;

65°C – для проводів із гумовою теплостійкою ізоляцією;

70°C – для проводів із полівінілхлоридною ізоляцією.

Максимально допустима температура для кабелів із паперовою ізоляцією в металевій (свинцевій або алюмінієвій) оболонці:

– 80°C – при напрузі 3 кВ;

– 65°C – при напрузі 6 кВ;

– 60°C – при напрузі 10 кВ;

– 50°C – при напрузі 20 та 35 кВ.

При роботі електричної мережі температура проводу або кабелю не повинна перевищувати встановлених значень. Тому при виборі перерізу проводів за допустимим нагріванням основною задачею є визначення величини струму, який можна пропустити через провід при заданих умовах, так щоб його температура не перевищила допустимих значень.

Для розрахунку проводів за допустимим нагріванням, крім максимально допустимої температури проводу t необхідно також знати температуру повітря $t_{0,П}$ або ґрунту $t_{0,Г}$.

За розрахункову температуру t_0 приймають середньомісячну температуру оточуючого середовища о 13⁰⁰ найспекотнішого місяця року. Для проводів, що прокладені всередині приміщень, за розрахункову приймають максимальну середньомісячну температуру повітря в приміщенні.

Згідно із (5.1), при проходженні електричного струму по проводу в ньому виділяється певна кількість теплоти Q . В цей же час, із поверхні проводу в середовище, що його оточує виділяється (розсіюється) теплота Q' , Дж, яка визначається за виразом:

$$Q' = c S (t - t_0) \tau, \quad (5.2)$$

де c – коефіцієнт теплової віддачі поверхні проводу, Вт/(м² · °С);
 S – площа поверхні проводу, м²;
 t_0 – температура середовища, що оточує провід, °С;
 t – температура поверхні проводу, °С
 τ – час протікання струму, години.

У випадку, коли температура проводу встановилася, кількість теплоти, яка виділяється в проводі, дорівнює кількості теплоти, яка віддається у середовище, що його оточує, тобто

$$Q = Q', \quad (5.3)$$

або

$$I^2 \cdot r \cdot \tau = c \cdot S (t - t_0) \cdot \tau. \quad (5.4)$$

Із виразу (5.4) можемо виразити квадрат струму:

$$I^2 = \frac{c \cdot S (t - t_0)}{r}. \quad (5.5)$$

Відомо, що площа поверхні проводу визначається за виразом:

$$S = \pi \cdot d \cdot l, \quad (5.6)$$

а опір проводу певної довжини та діаметру визначається за виразом:

$$r = \frac{l}{\gamma \cdot F} = \frac{4l}{\gamma \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (5.7)$$

де l – довжина проводу, м;

γ – питома провідність матеріалу проводу, См/м

F – переріз проводу, м²;

d – діаметр проводу, м.

Тоді вираз (5.5) прийме вигляд:

$$I^2 = \frac{c \cdot \pi^2 \cdot d^3 \cdot \gamma \cdot (t - t_0)}{4}. \quad (5.8)$$

$$I = I_{\text{дон}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{c \gamma d^3 (t - t_0)}. \quad (5.9)$$

Із виразу (5.9) можна зробити висновок, що струм $I = I_{\text{дон}}$, протікаючи по проводу, при заданих параметрах проводу і навколишнього середовища, не нагріває його вище допустимої максимальної температури t .

На основі виразу (5.9) в ПУЕ наведено таблиці допустимих струмів для проводів різного перерізу. Вказані таблиці складені для відповідної температури повітря і ґрунту:

$t_{0.П} = 25$ °С – для повітря;

$t_{0.Г} = 15$ °С – для ґрунту.

Вираз (5.9) можна використовувати для визначення величин при переході до інших умов роботи проводу.

Допустимий струм, який наведено в таблицях ПУЕ необхідно привести до реальних умов (до реальної температури). Для цієї мети використовують поправочний температурний коефіцієнт.

$$I_{\text{доп.табл}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{c \gamma d^3 (t - 25^0)}. \quad (5.10)$$

Якщо розділити (5.9) на (5.10) отримаємо:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.табл}} \cdot \sqrt{\frac{(t - t_0)}{(t - 25^0)}}, \quad (5.11)$$

або

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.табл}} \cdot k_t, \quad (5.12)$$

де k_t – поправочний температурний коефіцієнт.

Коефіцієнт k_t також приймається за таблицями ПУЕ, гл. 1.3.

$$k_t = \sqrt{\frac{(t - t_0)}{(t - 25^0)}} \text{ – для повітря; } k_t = \sqrt{\frac{(t - t_0)}{(t - 15^0)}} \text{ – для ґрунту.}$$

Користуючись виразом (5.9) можна визначати $I_{\text{доп}}$ для інших умовах, які відрізняються від розглянутих (інший матеріал проводу, інша температура та ін.).

Із збільшенням перерізу проводу зменшується допустима густина струму $J_{\text{доп}}$ в провіднику. Це пояснюється тим, що при збільшенні діаметра проводу переріз зростає пропорційно квадрату діаметра ($F = \pi \cdot d^2 / 4$), а його поверхня збільшується пропорційно першому степеню діаметра ($S = \pi \cdot d \cdot l$). Тобто із

збільшенням діаметру проводу, поверхня, що приходиться на одиницю перерізу, зменшується, відповідно, погіршуються умови охолодження проводу. У зв'язку із цим, іноді доцільно прокладати замість одного проводу два із сумарним перерізом меншим, ніж переріз одного проводу.

Для повітряних ліній електропередачі дуже рідко вибирають переріз проводів за допустимим нагріванням. В цьому випадку їх вибирають за допустимою втратою напруги або за економічною густиною струму.

Під час експлуатації електричних мереж можливі порушення нормального режиму роботи, що ведуть до збільшення струму. При короткому замиканні або при перевантаженні, проводка повинна автоматично відключатися, інакше може загорітися ізоляція. Для автоматичного відключення проводки при перевищенні встановлених значень струму застосовують апарати захисту – плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі та ін.

Якщо проводка захищена запобіжниками або автоматами, то розрахунок електричної мережі починають з вибору апаратів захисту.

5.2 Вибір плавких запобіжників та автоматичних вимикачів

Вибір плавких запобіжників.

Плавкий запобіжник – найпростіший апарат захисту, який в загальному вигляді складається із корпусу, плавкої вставки та контактної системи.

При короткому замиканні плавка вставка запобіжника перегоряє практично миттєво. Плавкий запобіжник – дуже недосконалий апарат, тривалість перегорання плавкої вставки при перевантаженні

залежить від сили струму перевантаження. При струмах, які в 2,5...3 рази більші від номінального, плавка вставка перегоряє за 8...10 секунд, а при струмах в 1,5 рази більших від номінального – за 1 годину, при струмах в 1,2 рази більше номінального – плавка вставка може не перегоріти тривалий час (рисунок 5.1).

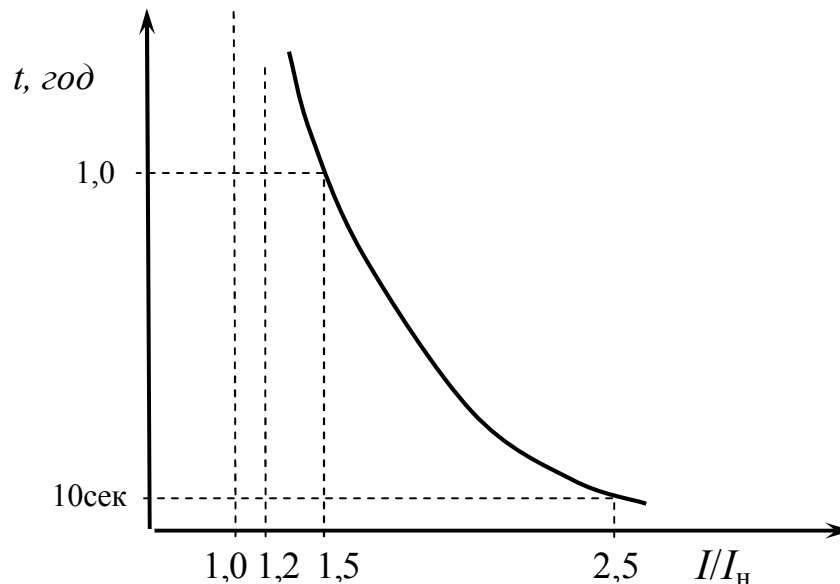


Рисунок 5.1 – Захисна характеристика плавкого запобіжника

Запобіжником із плавкою вставкою можуть захищатися як один споживач електричної енергії так і група споживачів.

Плавкі запобіжники вибирають за наступними параметрами.

1. За типом запобіжника.
2. За номінальною напругою запобіжника:

$$U_{н. зап} \geq U_{н. мер}, \quad (5.13)$$

де $U_{н. мер}$ – номінальна напруга мережі, В.

3. За номінальним струмом запобіжника:

$$I_{н. зап} \geq I_p. \quad (5.14)$$

де I_p – тривалий робочий струм лінії, А.

4. За номінальним струмом плавкої вставки:

1) струм плавкої вставки запобіжника для захисту окремого струмоприймача вибирається більшим із двох умов:

– **умова 1:**

$$I_{н.в} \geq I_p; \quad (5.15)$$

а) для електродвигуна:

$$I_p = \kappa_3 \cdot I_n = \kappa_3 \cdot \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}, \quad (5.16)$$

де κ_3 – коефіцієнт завантаження електродвигуна;
 P_n – номінальна потужність електродвигуна, кВт;
 U_n – номінальна напруга мережі, кВ;
 $\cos \varphi_n$ – коефіцієнт потужності при номінальному завантаженні;
 η_n – коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) електродвигуна при номінальному завантаженні;

б) для освітлювального навантаження:

$$I_p = \frac{P_l}{\sqrt{3} U_n}, \quad (5.17)$$

де P_l – освітлювальне навантаження лінії, кВт.

– **умова 2:**

$$I_{н.в} \geq \frac{I_{\max}}{\alpha}, \quad (5.18)$$

де I_{\max} – максимальний струм лінії обумовлений запуском електродвигуна, А;

α – коефіцієнт, що враховує умови пуску електродвигунів;
 $\alpha = 2,5$ при легкому пуску (5...10с), $\alpha = 1,6...2,0$ при важкому пуску електродвигуна (до 40с).

Максимальний струм лінії, що живить один електродвигун:

$$I_{\max} = I_{\text{пуск}} = \kappa_i \cdot I_n, \quad (5.19)$$

де κ_i – кратність пускового струму електродвигуна.

2) для мережі, яка живить групу струмоприймачів **умова 1** (5.15) та **умова 2** (5.18) записується так:

– умова 1:

$$I_{н.в} \geq k_0 \cdot \sum I_{pi}, \quad (5.20)$$

де k_0 – коефіцієнт одночасності.

Для групи струмоприймачів, серед яких є електродвигуни максимальний струм лінії визначається за виразом:

$$I_{\max} = k_0 \cdot \sum I_{p(n-1)} + I_{пуск1}, \quad (5.21)$$

де $I_{пуск1}$ – пусковий струм одного електродвигуна, під час пуску якого максимальний струм в лінії буде найбільшим, А;

$\sum I_{p(n-1)}$ – сума тривалих робочих струмів інших споживачів, без врахування електродвигуна із найбільшим пусковим струмом, А.

– умова 2:

$$I_{н.в} \geq \frac{k_0 \cdot \sum I_{p(n-1)} + I_{пуск1}}{\alpha}. \quad (5.22)$$

Умова селективності: необхідно, щоб номінальний струм плавкої вставки кожного наступного запобіжника (в напрямку до джерела живлення) був на один (два) ступеня більшим від номінального струму плавкої вставки попереднього запобіжника. Тобто, для забезпечення вибіркової дії запобіжників необхідно, щоб при порушенні нормального режиму перегорів найближчий до місця пошкодження запобіжник.

Вибір автоматичних вимикачів.

Автоматичний вимикач вибирають за наступними параметрами.

1. За типом автомата.
2. За номінальною напругою автомата:

$$U_{н.авт} \geq U_{н.мер}. \quad (5.23)$$

3. За номінальним струмом автомата:

$$I_{н.авт} \geq I_p. \quad (5.24)$$

4. За номінальним струмом теплового розчіплювача автомата:
– для мережі, яка живить одного споживача:

$$I_{н.т.р.} \geq 1,25 I_p; \quad (5.25)$$

– для мережі, яка живить групу струмоприймачів:

$$I_{н.т.р.} \geq 1,25 k_0 \cdot \sum I_{pi}, \quad (5.26)$$

5. За струмом спрацювання електромагнітного розчіплювача (відсічки):

$$I_{с.ем.р.} \geq 1,25 I_{\max}. \quad (5.27)$$

I_{\max} визначається за формулами (5.19) або (5.21).

$$I_{с.ем.р.} = k_{відс} I_{н.т.р.} \quad (5.28)$$

де $k_{відс}$ – кратність відсічки (паспортна характеристика).

5.3 Вибір перерізу проводів за допустимим нагріванням

Вибір перерізу проводів для мереж, що захищаються плавкими запобіжниками.

Після того, як визначили номінальний струм плавкої вставки вибирають відповідний йому переріз проводу. Вибір перерізу проводу залежить від того чи буде він захищатися плавкою вставкою лише від к.з., чи й від перевантаження також.

Від коротких замикань необхідно захищати всі електричні мережі.

Від перевантаження необхідно захищати:

- всі мережі у вибухонебезпечних приміщеннях;
- освітлювальні мережі в житлових та суспільних приміщеннях, в торгових та службово-побутових приміщеннях виробничих підприємств та в пожежонебезпечних зонах;
- мережі будь-якого призначення виконані проводами із горючою ізоляцією, які прокладені відкрито;
- силові мережі промислових підприємств, житлових, громадських і торговельних приміщень, в яких за умовами технологічного процесу або режиму роботи можуть виникнути тривалі перевантаження.

• Якщо мережу необхідно захистити від короткого замикання та перевантаження, тоді:

- допустимий струм проводів із полівінілхлоридною, гумовою та аналогічною ізоляцією визначається за виразом:

$$I_{\text{дон}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{н.в}}, \quad (5.29)$$

де $I_{\text{дон}}$ – допустимий струм проводу, А;

- допустимий струм кабелів з паперовою ізоляцією:

$$I_{\text{дон}} \geq I_{\text{н.в}}. \quad (5.30)$$

• Якщо проводку необхідно захищати лише від струмів к.з., тоді:

$$I_{\text{дон}} \geq 0,33 \cdot I_{\text{н.в}}. \quad (5.31)$$

За значенням допустимого розрахункового струму та способу прокладки проводу за таблицями ПУЕ визначають значення допустимого табличного струму та відповідний йому стандартний переріз проводу або кабелю.

Вибраний провід перевіряють за тривалим робочим струмом:

$$I_{\text{дон}} \geq I_p, \quad \text{або} \quad I_{\text{дон табл}} k_t \geq I_p, \quad (5.32)$$

де k_t – поправочний температурний коефіцієнт.

Переріз нульового проводу повинен становити не менше 50% від перерізу фазного проводу (може бути меншим на один ступінь).

Вибір перерізу проводів для мереж, що захищаються автоматичними вимикачами.

Після того, як визначили номінальний струм та тип розчіплювача автоматичного вимикача вибирають відповідний йому переріз проводу. Вибір перерізу проводу, як і у випадку із запобіжниками, залежить від того чи буде захищатися мережа лише від к.з., чи й від перевантаження також.

• При захисті проводки від перенавантажень та к.з. згідно із ПУЕ необхідно виконувати наступні умови:

1) при захисті мережі автоматами, які мають лише електромагнітний розчіплювач, допустимий струм проводів із полівінілхлоридною та гумовою ізоляцією визначають за умовою:

$$I_{\text{дон}} \geq 1,25 \cdot I_{y.a}, \quad (5.33)$$

де $I_{y.a}$ – струм уставки автоматичного вимикача, А.

2) при захисті мережі автоматами, які мають лише електромагнітний розчіплювач і працюють у вибухобезпечних виробничих приміщеннях, допустимий струм проводів із полівінілхлоридною та гумовою ізоляцією допускається визначати за умовою:

$$I_{\text{дон}} \geq I_{y.a} \quad (5.34)$$

Умову (5.34) необхідно також виконувати у наступних випадках:

– для кабелів з паперовою ізоляцією, які захищаються автоматами лише із електромагнітним розчіплювачем;

– для провідників усіх марок при використанні вимикачів з нерегульованими тепловими розчіплювачами, з відсічкою або без неї;

– для проводів із полівінілхлоридною та гумовою ізоляцією з вимикачами які мають регульований тепловий розчіплювач.

3) для кабелів із паперовою ізоляцією та ізоляцією із вулканізованого поліетилену, які захищаються вимикачами із регульованим тепловим розчіплювачем допустимий струм визначають за умовою:

$$I_{\text{дон}} = 0,8 I_{y.a.} \quad (5.35)$$

На відгалуженнях до електродвигунів із короткозамкненим ротором у вибухобезпечних зонах необхідно виконувати умову:

$$I_{\text{дон}} \geq I_{н.дв}, \quad (5.36)$$

а у вибухонебезпечних зонах:

$$I_{\text{дон}} \geq 1,25 I_{н.дв}. \quad (5.37)$$

• Якщо проводку необхідно захищати тільки від к.з., то допустимий струм проводів визначають за наступними умовами:

1) для автоматів з тепловим не регульованим розчіплювачем:

$$I_{\text{дон}} \geq I_{н.т.р.}; \quad (5.38)$$

2) для автоматів із тепловими регульованим розчіплювачем:

$$I_{\text{дон}} \geq 0,8 \cdot I_{н.т.р.}; \quad (5.39)$$

3) для автоматів які мають лише електромагнітний розчіплювач:

$$I_{\text{дон}} \geq 0,22 \cdot I_{с.е.м.р.}, \quad (5.40)$$

Вибраний переріз проводів повинен задовольняти наступні умови (5.32):

$$I_{\text{дон}} \geq I_p, \quad \text{або} \quad I_{\text{дон табл}} k_t \geq I_p.$$

Для відгалужень до електродвигунів:

$$I_{доп} \geq I_{н.дв}, \quad \text{або} \quad I_{доп табл} k_t \geq I_{н.дв}.$$

Вибрані захисні апарати повинні бути перевірені за умовами надійності спрацювання (чутливості) за наступними співвідношеннями.

Для плавких запобіжників та автоматів із тепловими розчіплювачами:

$$\frac{I_{к}^{(1)}}{I_{н.в}} \geq 3, \quad \frac{I_{к}^{(1)}}{I_{н.т.р.}} \geq 3. \quad (5.41)$$

де $I_{к}^{(1)}$ – струм однофазного к.з. в кінці лінії, що захищається, А.

Для автоматів з електромагнітними розчіплювачами:

$$\frac{I_{к}^{(1)}}{I_{с.ем.р.}} \geq 1,25 \dots 1,4 \quad (5.42)$$

1,25 – для автоматів із $I_{н.авт} > 100$ А;

1,4 – для автоматів із $I_{н.авт} \leq 100$ А.

Запитання для самоконтролю

1. Які допустимі температури нагрівання голих та ізольованих проводів ?

2. Які допустимі температури нагрівання кабелів з паперовою ізоляцією при різних класах напруги?

3. Чим обмежується температура нагрівання проводів?

4. За рахунок чого теплота з поверхні проводу передається в оточуюче середовище.

5. За якими умовами вибираються плавкі вставки запобіжників?

6. За якими умовами вибираються струми розчіплювачів автоматичних вимикачів?
7. Як враховується пусковий струм електродвигунів при виборі апаратів захисту?
8. Як вибирається переріз проводів, що захищаються плавкими запобіжниками за допустимим нагріванням?
9. Як вибирається переріз проводів, що захищаються автоматичними вимикачами за допустимим нагріванням?
10. У яких випадках проводку захищають від перевантажень?
11. Коли проводку захищають лише від короткого замикання?
12. У чому переваги автоматичних вимикачів перед плавкими запобіжниками?
13. Що таке вибірковість (селективність) дії захисту? Як вона забезпечується?
14. Що таке чутливість (надійність) захисного апарату?
15. За якими умовами перевіряють апарати захисту за чутливістю?