

4 ЕЛЕКТРИЧНА ТЕХНОЛОГІЯ

Електротехнологічні процеси широко застосовуються в промисловості й підрозділяються на:

1) електротермічні процеси, в яких використовується перетворення електричної енергії в теплову для нагрівання матеріалів і виробів з метою зміни їхніх властивостей або форми, а також для їхнього плавлення і випару;

2) електрозварювальні процеси, в яких одержувана з електричної енергії теплова енергія використовується для нагрівання тіл з метою здійснення нероз'ємного з'єднання із забезпеченням безпосередньої суцільності в місці зварювання;

3) електрохімічні методи обробки й одержання матеріалів, при яких за допомогою електричної енергії здійснюється розкладання хімічних сполук і їхній розподіл шляхом переміщення заряджених часток (іонів) у рідкому середовищі під дією електричного поля (електроліз, гальванотехніка, анодна електрохімічна обробка);

4) електрофізичні методи обробки, при яких для впливу на матеріали використовується перетворення електричної енергії як у механічну, так і в теплову (електроерозійна, ультразвукова, магнітоімпульсна, електровибухова);

5) аерозольна технологія, при якій енергія електричного поля використовується для надання електричного заряду зваженим у газовому потоці дрібним часткам речовини з метою переміщення їх під дією поля в потрібному напрямку.

Термін „електротехнологічні установки й устаткування” включає агрегати, в яких здійснюються електротехнологічні процеси, а також допоміжні електротехнологічні апарати і прилади. До них відносяться: електричні печі й електричні нагрівальні установки, електрозварювальні установки усіх видів, установки для розмірної електрофізичної і електрохімічної обробки металів і установки електроаерозольної технології, а також джерела живлення, пристрої захисту, керування.

Різноманіття електропечей класифікувати за технологічним призначенням неможливо, тому що для того самого процесу можна використовувати кілька різних типів електротермічного устаткування. За цією ознакою довелося б обмежитися розподілом електропечей на плавильні й термічні. Класифікація електропечей проведена за принциповою ознакою – за способом перетворення електричної енергії в теплову (табл. 4.1).

Електропечі опору за способом перетворення електричної енергії в теплову розділяються на печі непрямої дії й установки прямого нагрівання. За технологічним призначенням печі непрямого нагрівання можна розділити на три групи: термічні, плавильні й сушильні печі. Печі непрямого нагрівання розділяються за температурним режимом на низько- (температурна границя лежить у межах 600-650°C і процеси теплообміну йдуть з переважною роллю конвекції), середньо- (1200-1250°C) і високотемпературні печі (вище 1250°C). Тепло передається за рахунок теплопровідності тіла, що нагрівається. Потужність випромінювання залежить від ступеня чорності і різниці температур нагрівача і тіла, від площі випромінювання і конструкції нагрівача та печі.

Таблиця 4.1-

Класифікація електротермічних установок за способом перетворення електричної енергії в теплову.

Рід нагрівання	Спосіб перетворення енергії	Область застосування	Електротермічне устаткування
Нагрівання опором	Електроенергія перетворюється в теплову при протіканні струму через тверді або рідкі тіла (ефект Джоуля)	Нагрівання металів під термообробку і пластичну деформацію; плавка металів; сушіння матеріалів; нагрів у вакуумі і контрольованій атмосфері	Електропечі опору; конвективні й радіаційні, періодичного і безперервної дії, нагрівальні й плавильні; установки контактного нагрівання; інфрачервоне нагрівання
Нагрівання електричною дугою	Електроенергія перетворюється в теплову в дуговому розряді в газоподібному середовищі або в парах металу	Плавка чорних і кольорових металів; вакуумна дугова плавка; плазмові плавка і напилювання; плазмовий нагрів газів і одержання ацетилену; одержання якісних виливків	Електричні дугові печі прямої і непрямої дії; вакуумні дугові печі; плазмові дугові установки
Нагрівання дугою і опором	Електроенергія перетворюється в теплову в дуговому розряді і при протіканні струму в твердих і рідких тілах	Одержання феросплавів, карбиду кальцію, чавуна, фосфору, абразивів, міднонікелевого штейну і ряду кольорових металів	Руднотермічні печі; феросплавні, для одержання карбиду кальцію, фосфору, абразивів

Нагрівання переважно в перемінном у магнітному полі	Електроенергія перетворюється в енергію змінного магнітного поля, а потім у теплову в поміщених у цьому полі тілах	Плавка чорних і кольорових металів; нагрів металів під термообробку і пластичну деформацію; поверхнєве загартування; зонна плавка; безелектродний розряд	Індукційні плавильні печі: каналні й тигельні, періодичної і безперервної дії; індукційні нагрівальні установки; установки поверхневого загартування
Нагрівання переважно в змінному електричному полі	Електроенергія перетворюється в енергію перемінного електричного поля, а потім у теплову у вміщених в це поле тілах	Нагрівання діелектриків і пластмас під полімеризацію; сушіння матеріалів; стерилізація продуктів; готування їжі	Установки діелектричного нагрівання
Нагрівання електронним пучком	Енергія електронного пучка перетворюється в теплову в тілах, що бомбардуються електронами пучка	Плавка у вакуумі високореакційних кольорових і чорних металів; нагрів металів у вакуумі; напилювання; зонна плавка	Електронні плавильні й нагрівальні установки переривчастої і безперервної дії; установки для зонної плавки

Від конструкції нагрівача залежить тепловий ККД печі, тому що при однаковій електричній потужності нагрівача швидкість нагрівання робочого простору печі залежить від площі випромінювання. Ідеальним є варіант, коли нагрівач є суцільним циліндром, у середині якого знаходиться абсолютно чорне тіло, що нагрівається.

Потужність випромінювання з одиниці випромінюючої поверхні ідеального нагрівача називають питомою поверхневою потужністю:

$$W_i = \frac{P}{F}, \frac{Вт}{см^2}. \quad (4.1)$$

Питома поверхнева потужність визначає максимальну кількість теплоти, випромінюваної з одиниці площі поверхні нагрівача залежно

від різниці температур нагрівача і тіла і представлена у формі ряду кривих (рис. 2).

Для нагрівачів інших конструкцій, що відрізняються від ідеального, питома поверхнева потужність зменшується на величину коефіцієнта ефективності випромінювання α , тобто $W_n = \alpha W_i$. Коефіцієнт ефективності випромінювання нагрівача залежно від конструкції вибирають з табл. 4.2.

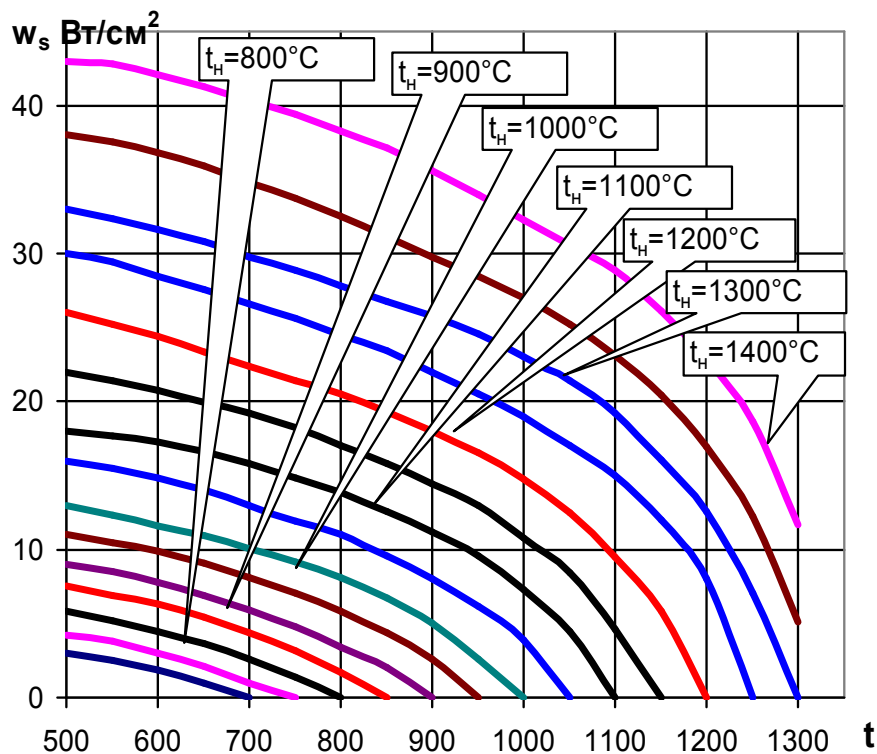
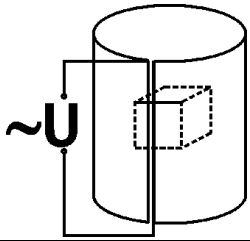
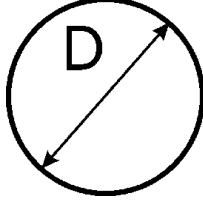
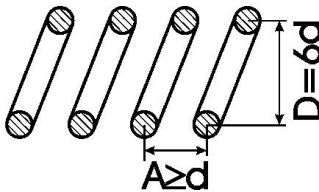
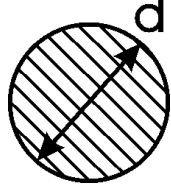
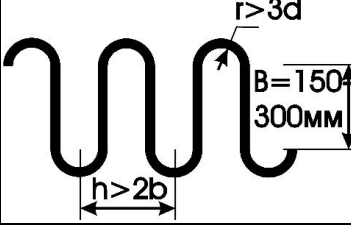
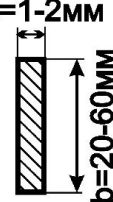
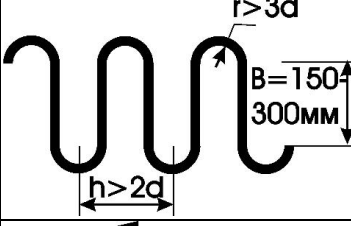
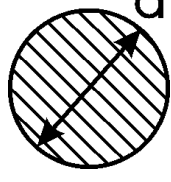
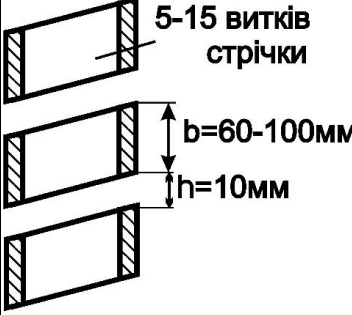



Рис.2 - Графіки питомої поверхневої потужності випромінювання ідеального абсолютно чорного нагрівача

Розрахунок нагрівача полягає у визначенні його довжини, площі поперечного перерізу, форми і схеми розташування в робочому просторі печі. Вихідні дані для розрахунку: призначення печі, матеріал, що нагрівається, його теплоємність C [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot ^\circ\text{C}$] (див. у Додатку) і маса m у кг, початкова і кінцева температури нагрівання t_1 і t_2 , необхідний час нагрівання T в секундах, напруга мережі живлення. Попередньо приймають ККД печі $\eta = 0,6$. Тоді розрахунок проводиться в такій послідовності. Визначають необхідну кількість теплоти Θ для нагрівання й електричну потужність P_n печі:

$$\Theta = Cm(t_1 - t_2), \text{ кДж}; \quad P_n = \frac{\Theta}{\eta T}, \text{ кВт}. \quad (4.2)$$

Таблиця 4.2.

Конструкція нагрівача	Форма нагрівача	Поперечний періз матеріалу	Коефіцієнт ефективності випромінювання нагрівача
Ідеальний у формі циліндра			1
Спіраль			0,3
Стрічковий зигзаг			0,4
Дротовий зигзаг двотрубчастий заповнений піском			0,6
Лінійний індуктор			0,9

За таблицею вибирають форму нагрівача, його профіль і матеріал згідно з Додатком для його виготовлення. Робочу температуру нагрівача приймають не менше як на 100°C вище кінцевої температури в печі, але

не більше максимально припустимої для даного матеріалу. За таблицею визначають питому поверхневу потужність випромінювання нагрівача $W_n = \alpha W_i$. Необхідна площа поверхні випромінювання нагрівача $F = P_n / W_n$, [см²] і його довжина для круглого профілю $l = F / \pi d$, для прямокутного $l = F / 2(a + b)$.

Електричний опір нагрівача і напругу його живлення визначаються за

$$R = \frac{\rho l}{S}; U = \sqrt{P_n R} \quad (4.3)$$

Як правило, напруга живлення печі нижче від мережної, тому застосовують понижуючий трансформатор або тиристорний регулятор напруги, які мають перевагу через ціну і габарити. Силовий кабель вибирають за таблицею Додатка.

Дугові електропечі відносять до першої категорії електричного постачання. Температура електричної дуги досягає 5000 °С. Вольтамперна характеристика дуги, тобто залежність напруги на дузі від її струму, нелінійна. Для запалювання дуги необхідно спочатку виконати штучне коротке замикання (КЗ), а потім, піднімаючи електроди створити дугу. Як джерело живлення дуги використовують спеціальні пічні трансформатори, до яких ставляться наступні вимоги:

- 1) обмежувати кидки струму КЗ при запалюванні дуги і коливанні напруги в мережі;
- 2) забезпечувати умови стабільного горіння дуги.

Розглянемо роботу пічного трансформатора і варіант визначення основних параметрів

При включенні первинної обмотки під напругу U_1 з'являється струм I_1 , що утворює потік Φ_1 (рис. 3):

$$\Phi_1 = \mu \mu_0 S \frac{I_1 W_1}{l}. \quad (4.4)$$

Для зручності аналізу потік розкладемо на дві складові: головний потік Φ , що замикається по магнітопроводу, і потік розсіювання Φ_{σ} , що замикається по повітрю. Вони утворюють ЕРС: головну E_1 і E_{σ} , що спрямовані зустрічно напрузі U_1 .

Рівняння рівноваги первинної обмотки і її струму

$$U_1 = I_1 R_1 + E_1 + E_{\sigma 1} \rightarrow I_1 = \frac{U_1 - E_1 - E_{\sigma 1}}{R_1}. \quad (4.5)$$

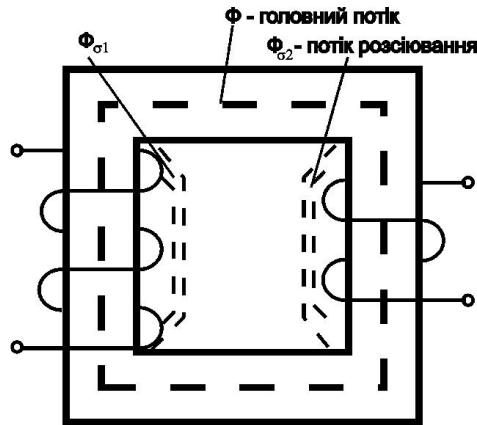


Рис. 3. - Магнітні потоки трансформатора

У первинній обмотці електроенергія перетворюється в енергію магнітного поля, головний потік якого індукує у вторинній обмотці ЕРС взаємоіндукції:

$$e_2 = W_2 \frac{d\Phi}{dt}; E_2 = \omega W_2 \Phi \quad (4.6)$$

Ці ЕРС, що індуковані загальним потоком, мають однаковий напрямок (рис. 4).

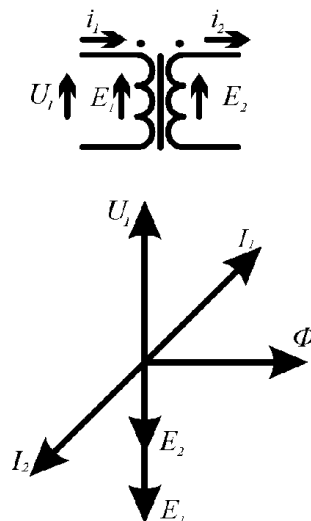


Рис. 4. - Напрямки ЕРС і струмів у трансформаторі

При замиканні ланцюга вторинної обмотки з'являється струм I_2 , що збігається з напрямком E_2 , але спрямований зустрічно струму I_1 , тобто на кут 180° .

Струм I_2 утворює, подібно струму I_1 , дві складові магнітного потоку: потік розсіювання, що замикається по повітрю $\Phi_{\sigma 2}$, і потік Φ_2 в осерді трансформатора, спрямований зустрічно головному потокові Φ (зустрічно спрямовані струми).

Потік Φ і відповідно ЕРС E_1 починають зменшуватися, при цьому починає збільшуватися струм I_1 до величини (рівноваги), достатньої для збільшення потоку Φ до первинного значення, змінюється і $\Phi_{\sigma 1}$. Таким чином, головний потік Φ , завдяки зворотному зв'язку (через ЕРС E_1) залишається практично постійним, а потоки розсіювання збільшуються. При цьому головний потік і вторинна ЕРС трохи зменшуються. У вторинній обмотці на величину $\Phi_{\sigma 2}$ зменшується потік Φ_2 , і вона «споживає» з мережі менше струм, що приводить до зменшення U_2 (рис. 5).

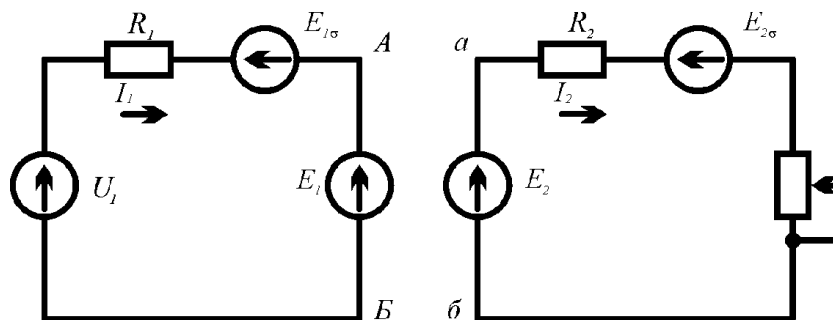


Рис.5. - Схема первинного і вторинного кіл

$$E_2 - I_2 R_2 - E_{\sigma 2} = U_2. \quad (4.7)$$

Для розрахунку складової повної потужності трансформатора і розрахунку струмів КЗ в обмотках необхідно подати його у вигляді сукупності активних і індуктивних опорів, з'єднаних у відповідну схему заміщення. Для електричного з'єднання первинної і вторинної обмоток у ланцюг необхідно параметри вторинної обмотки привести до первинної за такими формулами (рис. 6):

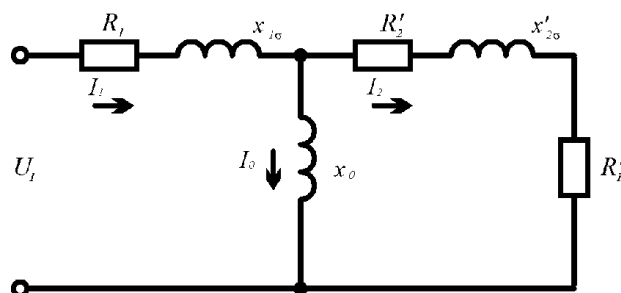


Рис.6. - Схема заміщення трансформатора

$$E_1 = E_2' = E_2 K_T; I_1 = I_2' = \frac{I_2}{K_T}; P_2 = P_2'; I_2^2 R_2 = I_2^{(1)2} R_2'; R_2' = R_2 K_T^2; \quad (4.8)$$

$$Q_{2\sigma} = Q_{2\sigma}'; I_2^2 X_{2\sigma} = I_2^{(1)2} X_{2\sigma}'; X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} K_T^2.$$

Параметри схеми заміщення розраховують з паспортних даних трансформатора, якої одержують у результаті експериментальних випробувань: номінальна потужність, напруга первинної і вторинної обмоток, напруга короткого замикання $U_k\%$ у відсотках від номінального значення напруги, при якій струм в обмотках дорівнює номінальному при короткозамкнутій вторинній обмотці, потужність P_k короткого замикання трьох фаз, потужність P_0 холостого ходу, струм I_0 холостого ходу у відсотках від номінального. Опір намагнічування визначають за

$$Z_0 = \frac{U_\phi}{I_0}; R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (4.9)$$

активні й індуктивні опори розсіювання - за

$$Z_K = \frac{U_K \%}{100} * \frac{U_H^2}{S_H}; R_K = R_1 + R_2' = \frac{P_K}{3I_{\phi 1ном}^2}; X_K = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \quad (4.10)$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2}; X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_K}{2}; R_2 = \frac{R_2'}{K_T^2}; X_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}'}{K_T^2}.$$

Реактивна потужність трансформатора складається з реактивної потужності холостого ходу, що не залежить від навантаження, і реактивної потужності розсіювання, що залежить від навантаження:

$$Q = Q_0 + Q_\sigma = \left(\frac{I_0 \%}{100} + \frac{U_K \%}{100} \right) S_H. \quad (4.11)$$

Основною відмінністю пічних трансформаторів від силових мережних є підвищений індуктивний опір і реактивна потужність розсіювання за рахунок розміщення обмоток на різних стрижнях сердечника. Це забезпечує, з одного боку, сприятливі умови для стійкого горіння дуги, тому що в момент переходу струму дуги через нуль до неї відразу прикладена напруга настільки більша, наскільки більше фазовий зсув між напругою і струмом, що забезпечує надійне перезапалювання дуги, а з другого - обмежує кидки струму в момент короткого замикання

при запалюванні дуги і коливання напруги в мережі. Такі коливання в мережі можуть створити аномальні режими для приймачів, підключених до силового трансформатора, від якого живиться і пічний трансформатор. Тому необхідно розрахувати провали напруги в мережі і при їхньому перевищенні норми встановити струмообмежуючий реактор. Для цього складаємо розрахункову схему і схему заміщення мережного і пічного трансформаторів. Визначаємо індуктивні опори короткого замикання X_k . При цьому X_k пічного трансформатора необхідно привести до первинної напруги мережного трансформатора за [1]. Розраховуємо первинний і вторинний струми КЗ мережного трансформатора за

$$I_{1T} = \frac{U_1}{(X_{KM} + X_{KP}^1)}; I_{2T} = I_{1T} K_{1T}. \quad (4.12)$$

Визначаємо індуктивний опір розсіювання $X_{2\sigma}$ вторинної обмотки мережного за (4.12). Знаходимо величину зниження вторинної напруги мережного трансформатора при номінальному струмі I_{2H} за

$$\Delta U_{2H} = I_{2H} * X_{2\sigma}; \quad (4.13)$$

і при струмі КЗ за

$$\Delta U_{2K} = I_{2K} * X_{2\sigma}. \quad (4.14)$$

Якщо $\Delta U_{2K} > \Delta U_{2H}$, то встановлюють реактор, індуктивний опір якого визначають за:

$$X_p = \frac{U_{2H} - I_{2H} X_{2\sigma} - I_{2H} X_{KPT}}{I_{2H}}, \quad (4.15)$$

де X_{KPT} – опір пічного трансформатора.