

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни

**«Системи електропостачання»**

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого(бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(Електромеханіка)***

**за темою № 2 – Електричні навантаження**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

**Розробник:** викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

**Рецензенти:**

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

### **План лекції:**

1. Загальні відомості.
2. Види електричних навантажень.
3. Графіки електричних навантажень.
4. Визначення розрахункових навантажень.
5. Розрахунок навантажень за технологічними даними.
6. Визначення розрахункових величин по методу коефіцієнта попиту.
7. Розрахунок електричних навантажень за коефіцієнтами використання та максимумами.
8. Визначення витрат електроенергії та втрат.

### **Рекомендована література:**

#### **Основна література:**

1. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2012.
2. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч.посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.І. та ін. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.
5. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

#### **Допоміжна література:**

1. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2006. -153 с.
2. Рудницький В.Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2007. - 280 с.
3. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті:**

1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електропостачання>
2. <https://www.ukrnafta.com/sistema-elektropostachannya>
3. <https://www.pronet.ua/sistemi-elektropostachannya/>
4. <http://web.kpi.kharkov.ua/elmarsh/wp-content/uploads/sites/108/2017/04/Elektropostachannya-promislovih-pidpriyemstv.-Pidruchnik.Milih-V.I-Pavlenko-T.P.2016.pdf>
5. <https://avenston.com/solutions/mep-systems/power-supply-systems/>

## Текст лекції

### 1. Загальні відомості.

При проектуванні систем електропостачання виконується ряд розрахунків, результати яких дозволяють вибрати устаткування підстанцій, перетини і матеріал провідників, найекономічніші способи передачі електричної енергії, конфігурацію мережі, розташування трансформаторних підстанцій тощо. Визначення розрахункових електричних навантажень та облік зміни їх в часі в цьому випадку є вихідним матеріалом для всього подальшого проектування.

Метою розрахунку є прогнозування графіка і визначення величини розрахункового навантаження за допомогою теоретичних методів на підставі даних досвіду по аналогічних підприємствах, а також на основі вивчення технології виробництва з погляду електричних навантажень. При цьому правильне визначення очікуваних електричних навантажень грає виключно важливу роль при рішенні вказаних вище питань. Неправильне визначення навантажень може звести до нуля ефект зусиль, що спрямовані на створення раціональної системи електропостачання.

При визначенні очікуваних електричних навантажень стикаються з певними труднощами, витікаючими з їх характеру вірогідності та необхідності прогнозу на розрахунковий період. Це вимагає значних обсягів дослідження і вивчення численної статистики, єдиної методики її обробки, а також встановлення економічно виправданого розрахункового рівня навантажень. Залежно від цілей та стадій проектування, методів розрахунку мереж і наявної інформації про споживачів, величини розрахункових навантажень і способи їх нормування можуть значно змінюватися. Останнє можна пояснити тим, що основні споживачі електричної енергії більшості підприємств працюють, як правило, в режимі, відмінному від тривалого, що приводить до частой зміни, і в широких межах їх навантаження протягом робочих періодів. Якщо ще врахувати, що двигуни окремих машин і механізмів вибирають іноді значно завищеної потужності, а робочі періоди (максимуми і мінімуми) навантажень окремих споживачів не зв'язані жорстко між собою в часі, то складність визначення очікуваних навантажень буде особлива чуттєва.

Ці обставини в значній мірі визначили відсутність в промисловості до теперішнього часу єдиного підходу до питання визначення очікуваних електричних навантажень і створення науково обгрунтованого методу їх розрахунку.

### 2. Види електричних навантажень.

При проектуванні електропостачання підприємств розрахункові навантаження визначають для груп різних електроприймачів, одержуючих живлення від підстанцій. Тому вихідними даними для визначення електричних навантажень окремих елементів і всієї системи

електропостачання є відомості про кількість споживачів, їх розташування і номінальні потужності.

Номінальна потужність. Вихідною базою для визначення величини навантаження від груп електроприймачів є номінальна (встановлена) потужність. Номінальна потужність електроприймача, як правило, наперед відома. Вона позначена в паспорті електроприймача. Номінальна потужність електродвигуна, виражена в кіловатах, це потужність  $p_n$ , що розвивається двигуном на валу при номінальній напрузі; номінальна потужність трансформатора  $s_n$ , виражена в кіловольт-амперах, або джерела світла  $p_n$ , виражена в кіловатах, це потужність, що споживається з мережі.

Під номінальною реактивною потужністю приймача  $q_n$  мається на увазі реактивна потужність, що споживається з мережі (знак «плюс») або що віддається в мережу (знак «мінус»), при номінальній активній потужності і номінальній напрузі (а для синхронних двигунів — і при номінальному струмі збудження або номінальному коефіцієнті потужності).

У розрахунках не слід вживати поняття "приєднана потужність" на затисках електродвигуна

$$p'_n = \frac{p_n}{\eta_n},$$

оскільки значення ККД при змінному навантаженні не дорівнює номінальному  $\eta$  і в загальному випадку залишається невідомим.

Потужність електроприймачів повторно-короткочасного режиму роботи приводиться до номінальної тривалої потужності по формулах:

а) для електроприймачів, паспортна потужність яких виражена в кіловатах (кіловарах)

$$p_n = p_{n,\varepsilon} \sqrt{TB}, \quad q_n = q_{n,\varepsilon} \sqrt{TB};$$

б) для електроприймачів, паспортна потужність яких виражена в кіловольт-амперах, при  $\cos \varphi \neq 1$ ,

$$p_n = s_{n,\varepsilon} \sqrt{TB} \cos \varphi_{n,\varepsilon}, \quad q_n = s_{n,\varepsilon} \sqrt{TB} \sin \varphi_{n,\varepsilon}$$

де  $TB$  - відносна тривалість включення;  $\cos \varphi_{n,\varepsilon}$  — паспортне значення коефіцієнта потужності та відповідний йому  $\sin \varphi_{n,\varepsilon}$ .

Групова номінальна активна (реактивна) потужність — це сума номінальних активних (реактивних) потужностей групи електроприймачів, приведених до  $TB = 1$  (окрім резервних):

$$P_n = \sum_1^n p_n, \quad Q_n = \sum_1^n q_n.$$

Середні навантаження. Графіки змінного навантаження характеризуються деякими усередненими її значеннями, що розглядаються нижче. Середні навантаження мають важливе значення у зв'язку з тим, що, по-перше, вони є основною статистичною характеристикою величини, що змінюється, і, по-друге, можуть служити для наближеної оцінки нижньої межі можливих значень розрахункового навантаження.

Середні навантаження (активна і реактивна потужність) приймача за будь-який інтервал часу в загальному вигляді визначаються відповідно з виразів:

$$P_c = \frac{\int_0^t p(t)dt}{t}, \quad Q_c = \frac{\int_0^t q(t)dt}{t}.$$

У умовах експлуатації середні навантаження розглядаються за певний характерний інтервал часу, наприклад за цикл, і визначаються за показами лічильників активної та реактивної електроенергії за допомогою виразів:

а) для одного електроприймача

$$P_c = \frac{\omega_t}{t}, \quad Q_c = \frac{v_t}{t};$$

б) для групи електроприймачів

$$P_c = \sum_1^n P_c, \quad Q_c = \sum_1^n Q_c \quad \text{або} \quad P_c = \frac{W_T}{T}, \quad Q_c = \frac{V_T}{T}$$

де  $\omega_t$ ,  $W_T$ ,  $v_t$ ,  $V_T$  – споживання активної і реактивної електроенергії окремим електроприймачем або групою відповідно.

Середні навантаження за інші характерні інтервали часу позначаються додатковим індексом, наприклад:  $P_{cm}$  ( $Q_{cm}$ ) — середнє навантаження по активній (реактивній) потужності за максимально завантаженою зміну;  $P_{cp}$  ( $Q_{cp}$ ) — середньорічне навантаження по активній (реактивній) потужності.

Середня активна  $P_{cm}$  (реактивна  $Q_{cm}$ ) потужність за саму завантаженою зміну є основною величиною при розрахунку навантажень груп електроприймачів і визначається тривалістю зміни ( $T_{cm}$ ) за формулою

$$P_{cm} = \frac{W_{cm}}{T_{cm}} \quad \text{або} \quad Q_{cm} = \frac{V_{cm}}{T_{cm}}.$$

При цьому самою завантаженою зміною вважається зміна з найбільшим споживанням електроенергії даною групою електроприймачів або підприємством в цілому для характерних діб.

Не менше значення мають і середньорічні навантаження, які можуть бути визначені з виразів

$$P_{cp} = \frac{W_p}{T_p}; \quad Q_{cp} = \frac{V_p}{T_p}; \quad \text{або} \quad P_{cp} = \alpha P_{cm}; \quad Q_{cp} = \alpha Q_{cm},$$

де  $\alpha$  — річний коефіцієнт змінності по енерговикористанню;  $T_p$  — річний фонд робочого часу.

Іноді доводиться розглядати середнє навантаження (наприклад, по активній потужності)

$$P_\theta(t) = \frac{1}{\theta} \int_t^{t+\theta} P(t)dt$$

за інтервал заданої тривалості  $\theta$  із змінною початковою точкою  $t$ .

Найбільш можливе значення  $P_{\theta m}$  при різних значеннях  $t$ , тобто максимум середнього навантаження за ковзаючий інтервал часу  $\theta$ , називають стисло  $\theta$  — максимумом, наприклад півгодинним, десятихвилинним тощо.

Оскільки витрати потужності в провіднику пропорційні квадрату навантаження, то мають значення квадратичні графіки, в першу чергу групові, які характеризуються ефективним навантаженням  $P_e$  за інтервал часу  $T$ :

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Q^2(t) dt} \quad \text{або} \quad P_e = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n P^2 t}{T}}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n Q^2 t}{T}}.$$

Середнє квадратичне реактивне навантаження  $Q_e$  має важливе значення для оцінки ефекту зниження витрат електроенергії в мережах при підвищенні коефіцієнта потужності.

Розрахункове максимальне навантаження. Розрахункова активна потужність  $P_m$ , відповідає такому тривалому навантаженню струмом  $I_m$ , яке еквівалентне очікуваному навантаженню, що змінюється, по найважчій тепловій дії — максимальній температурі або тепловому зносу ізоляції провідника або трансформатора. Оскільки відсутні достатні дані і норми теплового зносу ізоляції дротів і кабелів, розрахункове навантаження умовно приймається рівним вірогідному максимальному значенню навантаження за 30 хв. Проміжок часу 30 хв прийнятий як розрахунковий тому, що він близький до трьох постійних часу нагріву часто вживаних провідників малих і середніх перетинів (до 50 мм<sup>2</sup>). Для одноманітності розрахункової методики півгодинний максимум розглядається як розрахункове навантаження для вибору всіх елементів електропостачання, тобто провідників, трансформаторів і апаратури по нагріву.

Величина розрахункового максимуму струму групи електроприймачів визначається із співвідношення

$$I_m = \frac{S_m}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{P_m^2 + Q_m^2}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{P_m}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi_m}$$

де  $\cos \varphi_m$  — значення коефіцієнта потужності групи за період розрахункового максимуму активної потужності;  $U_n$  — номінальна напруга.

Пікове навантаження. Для розрахунку мереж, вибору трансформатора та іншого устаткування, окрім величини розрахункового навантаження  $P_m$ , необхідно знати максимальні піки навантаження, що створюються окремими могутніми електроприймачами.

Піковим навантаженням одного або групи електроприймачів називається короткочасне навантаження (тривалістю приблизно 1 – 2 с), обумовлене пуском електродвигунів, експлуатаційними короткими замиканнями дугових електропечей, електричною зваркою тощо. Пікове навантаження характеризується частотою її появи, крутизною наростання та

абсолютною величиною перевищення над середньою величиною навантаження.

Це навантаження приймається за основу в розрахунках коливань напруги, при виборі пристроїв і установок захисту і при перевірці електричних мереж за умов самозапуску електродвигунів після значного зниження напруги при коротких замиканнях.

Піковий струм групи електроприймачів напругою до 1000 В, працюючих при відстаючому струмі, з достатньою для практичних розрахунків точністю може визначатися за виразом

$$I_n = i_{n.m} + (I_m - k_{\varepsilon} i_{n.m}),$$

де  $i_{п.м}$  — пусковий струм двигуна максимальної потужності в групі, А;  $I_m$  — струм максимального навантаження всіх електроприймачів в групі, А;  $i_{н.м}$  — номінальний (приведений до ПВ = 1) струм двигуна максимальної потужності з найбільшим пусковим струмом, А;  $k_{\varepsilon}$  — середньовзважений коефіцієнт використання.

Коли в групі електроприймачів є відносно могутні синхронні двигуни, що працюють з випереджаючим або відстаючим струмом, або коли число електроприймачів в групі мале і їх номінальні потужності значно відрізняються один від одного, визначати піковий струм  $I_p$  слід за формулою

$$I_n = i_{n.m} + K'_m \frac{\sqrt{(P_{cm} - p_{cm})^2 + (Q_{cm} \pm q_{cm})^2}}{\sqrt{3}U_n}$$

де  $p_{cm}$ ,  $q_{cm}$  — середнє навантаження (активне і реактивне) двигуна, що пускається, в саму завантажену зміну (знак величини  $q_{cm}$  приймається позитивним при роботі з відстаючим струмом і негативним — при випереджаючому струмі);  $K_m$  — коефіцієнт максимуму для групи електроприймачів без двигуна, що пускається. В більшості випадків він може бути прийнятий рівним  $K_m$ , знайденому для всієї групи електроприймачів, що розраховується.

Піковий струм групи двигунів напругою вище 1000 В при їх самозапуску визначається спеціальним розрахунком. Також спеціальними розрахунками визначаються пікові струми для електроприймачів з ударними навантаженнями.

### 3. Графіки електричних навантажень.

Графіком навантаження називають графік, що зображає зміну активного  $P$  і реактивного  $Q$  навантаження в часі. Найбільш точно графік навантаження записують реєструючим ватметром або варметром. Звичайно графіки навантаження підстанцій і розподільних пунктів одержують шляхом зняття показів лічильника через рівні проміжки часу — через кожні 15 хвилин, півгодини, годину тощо. При цьому одержують ступінчастий графік (рис. 1),



координата кожного ступеня якого відповідає середньому навантаженню за прийнятий проміжок часу.

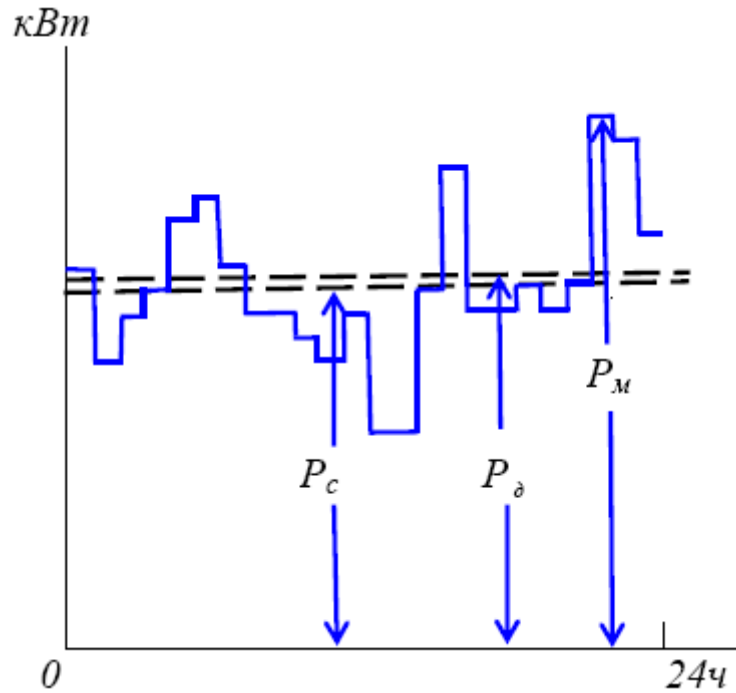


Рисунок - 1. Добовий графік активного навантаження

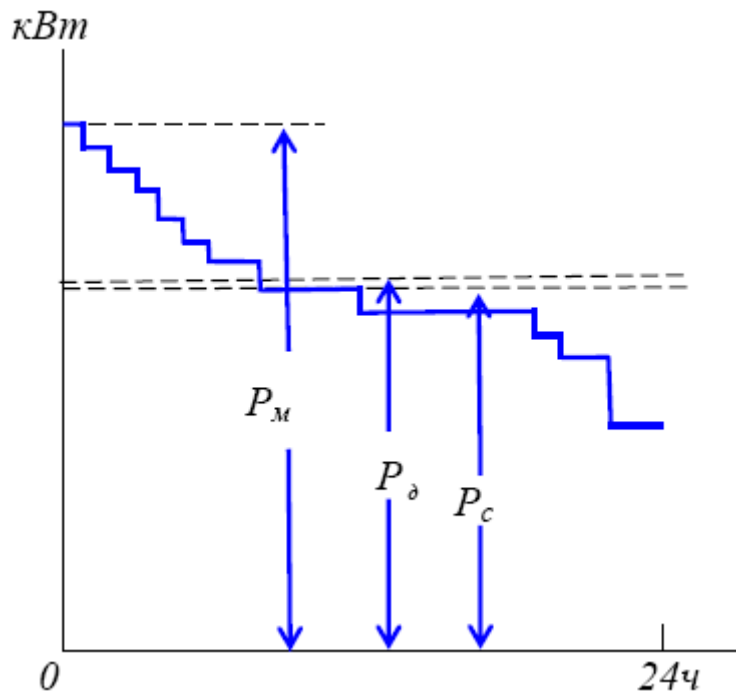


Рисунок - 2. Добовий графік активного навантаження за тривалістю

На рис.2 приведений так званий графік навантаження за тривалістю, який одержують з добового графіка навантаження шляхом підсумовування тривалостей існування кожної з потужностей. Кожній ординаті цього графіка відповідає сумарний час, протягом якого навантаження що не буде нижче величини, що цікавить нас. Площа, обмежена добовим графіком

навантаження або графіком навантаження за тривалістю і осями координат, дає в певному масштабі витрату активної  $W_a$  або реактивної  $W_p$  енергії за відповідний час  $T$ . Відношення витрат енергії до часу дає середню активну потужність, або середню реактивну потужність

$$P_c = \frac{W_a}{T}, \quad Q_c = \frac{W_p}{T}.$$

Для характеристики графіків навантаження застосовують наступні показники:

коефіцієнт заповнення графіка, що дорівнює відношенню середньої потужності  $P_c$  або  $Q_c$  до максимальної потужності  $P_m$  і  $Q_m$

$$K_{з.а} = \frac{P_c}{P_m}, \quad K_{з.р} = \frac{Q_c}{Q_m};$$

коефіцієнт максимуму — величина, зворотна коефіцієнту заповнення графіка

$$K_{м.а} = \frac{1}{K_{з.а}} = \frac{P_m}{P_c}; \quad K_{м.р} = \frac{1}{K_{з.р}} = \frac{Q_m}{Q_c};$$

число годин використання максимуму навантаження, дорівнює відношенню витрат енергії за відповідний час до величини максимуму навантаження

$$T_{в.а} = \frac{W_a}{P_m} = \frac{P_c T}{K_{м.а} P_c} = \frac{T}{K_{м.а}} = K_{з.а} T; \quad T_{в.р} = \frac{W_p}{Q_m} = K_{з.р} T.$$

Коефіцієнт заповнення графіка, коефіцієнт максимуму і число годин використання максимуму навантаження, що є взаємозв'язаними величинами, залежать від кількості та номінальних потужностей окремих споживачів, режимів їх роботи, а також від організації робіт на підприємстві в цілому або на даній його частині;

коефіцієнт форми графіка, дорівнює відношенню середнього квадратичного навантаження  $P_e$  або  $Q_e$  до середнього навантаження

$$K_{ф.а} = \frac{P_e}{P_c}; \quad K_{ф.р} = \frac{Q_e}{Q_c}.$$

Середнє квадратичне навантаження в загальному випадку визначається за формулами

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n P_k^2 t_k}{T}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n P_k^2}{n}}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n Q_k^2 t_k}{T}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n Q_k^2}{n}},$$

$$n = \frac{T}{t}$$

де  $t$  — число рівних відрізків часу, на які поділений графік.

Для повної характеристики графіка навантаження необхідно ще ввести показники, що визначають його зв'язок з номінальними потужностями і числом споживачів. Такими показниками є:

- коефіцієнт завантаження, що дорівнює відношенню фактичного середнього навантаження  $p_{с.в}$  або  $q_{с.в}$  споживача за час включення до його номінальної потужності

$$k_{зв.а} = \frac{P_{с.в}}{P_n}; \quad k_{зв.р} = \frac{q_{с.в}}{q_n};$$

- коефіцієнт використання, що дорівнює відношенню середньої споживаної потужності до потужності сумарної встановленої

$$K_{в.а} = \frac{P_c}{\sum_{k=1}^n P_n k}; \quad K_{в.р} = \frac{Q_c}{\sum_{k=1}^n q_n k}.$$

Коефіцієнт використання залежить від ступеня завантаження і режиму роботи споживачів, а також від витрат потужності в споживачах і мережах;

коефіцієнт попиту, що дорівнює відношенню максимуму навантаження до сумарної встановленої потужності

$$K_{с.а} = \frac{P_m}{\sum_{k=1}^n P_{нк}}; \quad K_{с.р} = \frac{Q_m}{\sum_{k=1}^n q_{нк}}.$$

Підставляючи замість максимуму навантаження його значення, виражене відповідно через середнє навантаження і коефіцієнт максимуму, а замість сумарної встановленої потужності її значення, виражене відповідно через середнє навантаження і коефіцієнт використання, одержуємо, що коефіцієнт попиту дорівнює добутку коефіцієнтів використання і максимуму:

$$K_{с.а} = \frac{K_{м.а} P_c K_{в.а}}{P_c} = K_{м.а} K_{в.а}; \quad K_{с.р} = \frac{K_{м.р} Q_c K_{в.р}}{Q_c} = K_{м.р} K_{в.р}$$

Таким чином, коефіцієнт попиту є узагальненим показником, що враховує ступінь завантаження споживачів, їх коефіцієнти корисної дії і коефіцієнт корисної дії мережі (витрати в споживачах і мережах), а також режим роботи споживачів і неспівпадання максимумів навантаження окремих споживачів в часі. Звідси, зокрема, витікає, що коефіцієнт попиту вище для споживачів з тривалим режимом, ніж для споживачів з повторно-короткочасним і короткочасним режимами, а при останніх двох режимах роботи коефіцієнт попиту тим нижче, чим більше число споживачів.

#### **4. Визначення розрахункових навантажень.**

У системі електропостачання промислового підприємства існує декілька характерних місць визначення розрахункових електричних навантажень. Розглянемо ці характерні місця на схемі рис. 3.

1. Визначення розрахункового навантаження, створюваного одним приймачем напругою до 1000 В (навантаження 1), необхідне для вибору перетину дроту або кабелю, що відходить до даного приймача, і апарату, за допомогою якого проводиться приєднання приймача до силової розподільної шафи або розподільної лінії.

2. Визначення розрахункового навантаження, створюваного групою приймачів напругою до 1000 В (навантаження 2), необхідне для вибору перетину радіальної лінії або розподільної магістралі, що живить дану групу приймачів, і апарату, що приєднує дану групу приймачів до головної силової розподільної шафи або живлячої магістралі в схемі блоку трансформатор-магістраль.

3. Визначення загального розрахункового навантаження на шинах низької напруги ТП або головної магістралі системи живлення блоку трансформатор — магістраль (БТМ) (навантаження 3) необхідно для вибору кількості та потужності цехових трансформаторів, перетину та матеріалу шин цехової ТП або головної магістралі та відключаючих апаратів, встановлюваних на стороні низької напруги цехових трансформаторів.

4. Визначення розрахункового навантаження, створюваного на шинах 6 – 20 кВ розподільних пунктів (РП) окремими приймачами або окремими цеховими трансформаторами з урахуванням витрат в трансформаторах (навантаження 4, 5), необхідне для вибору перетину дротів ліній, що відходять від шин РП і живлять цехові трансформатори та приймачі високої напруги, і відключаючих апаратів, встановлюваних на цих лініях.

5. Визначення загального розрахункового навантаження на шинах кожної секції ГЗП (навантаження 6) необхідне для вибору перетину і матеріалу шин 6 – 20 кВ РП, перетину ліній, що живлять кожну секцію шин РП, і відключаючої апаратури з боку шин головної знижувальної підстанції (ГЗП). Якщо від шин 6 – 20 кВ ГЗП безпосередньо живляться цехові трансформатори або приймачі, навантаження 6 означає те ж саме, що і навантаження 5 (див. вище), тільки відносно шин 6 – 20 кВ ГЗП.

6. Визначення загального розрахункового навантаження на шинах 6 – 20 кВ кожній секції ГЗП (навантаження 7) необхідно для вибору кількості та потужності знижувальних трансформаторів, встановлюваних на ГЗП, вибору перетину та матеріалу шин ГЗП і відключаючих апаратів, встановлюваних на стороні низької напруги 6 – 20кВ трансформаторів ГЗП.

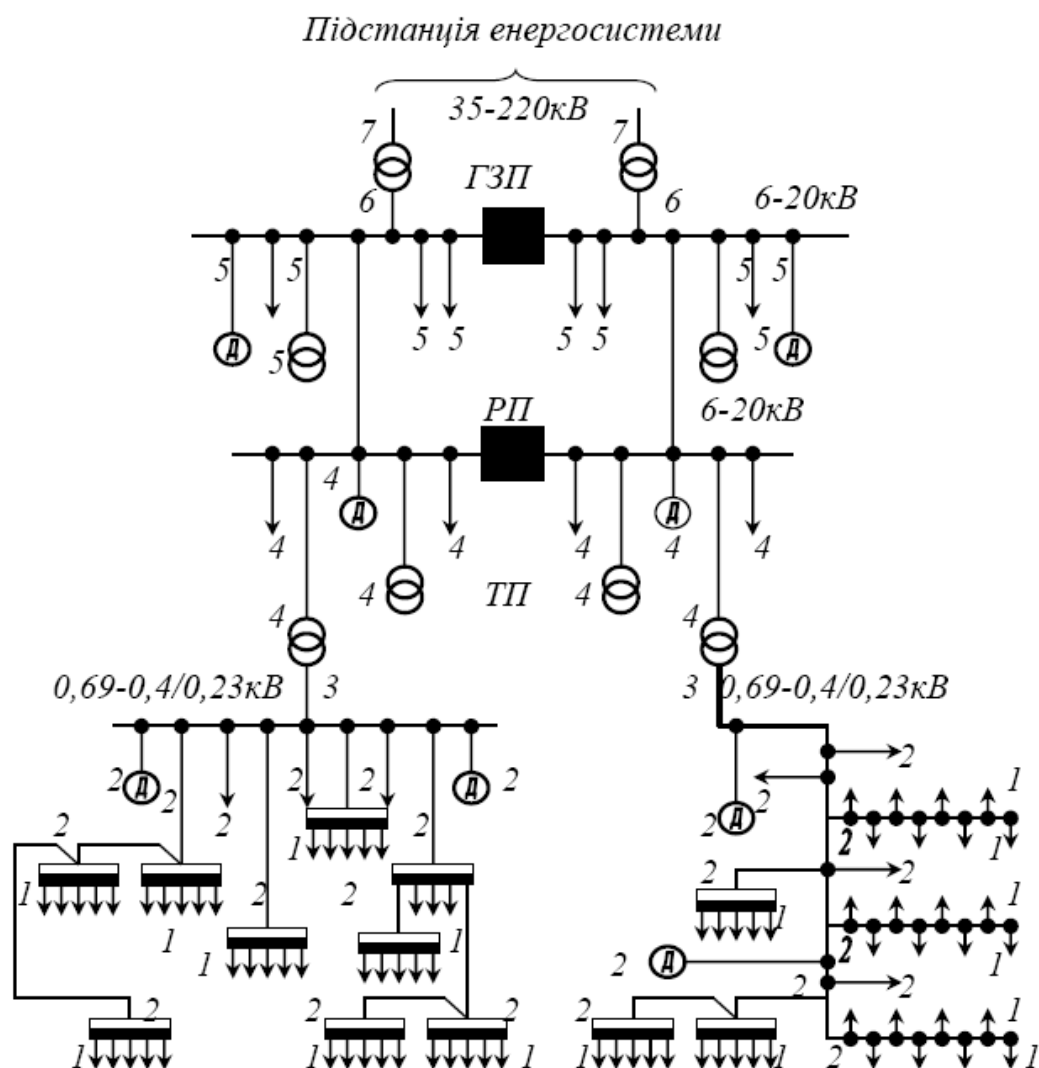


Рисунок - 3. Схема характерних місць визначення розрахункових навантажень в системі електропостачання підприємства

7. Визначення розрахункового навантаження на стороні вищої напруги 35 – 220 кВ трансформатора ГЗП з урахуванням витрат в трансформаторі необхідне для вибору перетинів ліній, що живлять трансформатори ГЗП, і апаратів приєднання трансформаторів і ліній, що їх живлять.

Залежно від місця визначення розрахункових навантажень і стадії проектування застосовуються і методи їх розрахунку, більш точні або спрощені.

Основні методи визначення розрахункових (очікуваних) електричних навантажень, вживані при проектуванні електропостачання промислових підприємств, можуть бути розділені на дві групи:

1. Методи, що визначають розрахункове навантаження множенням встановленої потужності на коефіцієнт, менший одиниці:

$$P_P = K_1 P_n.$$

2. Методи, що визначають розрахункове навантаження множенням середнього навантаження на коефіцієнт, більший одиниці або рівний їй:

$$P_p = K_2 P_c$$

або додаванням до середнього навантаження деякої величини, що характеризує відхилення розрахункового навантаження від середньої:

$$P_p = P_c + \beta \sigma.$$

### 5. Розрахунок навантажень за технологічними даними.

Для деяких типів електроприймачів індивідуальні, а отже, і групові навантаження незмінні в часі. До таких електроприймачів відносяться, наприклад, електроприводи насосів, компресорів, вентиляторів тощо. Для таких електроустановок може бути застосований метод питомої витрати електроенергії, згідно з яким розрахункове навантаження, що співпадає в даному випадку з середнім, визначається за формулою

$$P_m = P_{cm} = \frac{P_{cm} \omega_0}{T_{cm}}; \quad Q_m = Q_{cm} = P_m \operatorname{tg} \varphi_m,$$

де  $P_{cm}$  — кількість продукції, що випускається за зміну;  $\omega_0$  — витрата електроенергії на одиницю продукції;  $\operatorname{tg} \varphi_m$  — відповідає відношенню реактивної та активної потужностей при розрахунковому максимумі навантаження.

Проте при великих агрегатах різної потужності усереднені дослідно-статистичні значення  $\omega_0$  можуть приводити до значної помилки у визначенні величини  $P_m$ .

При великій кількості електроприймачів малої потужності, більш менш рівномірно розподілених на виробничій площі, для розрахунку електричних навантажень може бути рекомендований метод питомого навантаження на одиницю виробничої площі ( $1 \text{ м}^2$ ), тобто

$$P_m = P_{cm} = p_0 F; \quad Q_m = Q_{cm} = P_m \operatorname{tg} \varphi_m$$

де  $F$  — площа розміщення електроприймачів групи;  $p_0$  — розрахункове навантаження на  $1 \text{ м}^2$  виробничій площі.

Разом з тим цей метод не одержав широкого вживання через відсутність достатньої кількості дослідних даних про величину  $p_0$ .

Визначення розрахункових величин за витратою енергії та кількості годин використання максимуму навантаження. Розрахунок максимуму активного навантаження проводять за виразом

$$P_m = \frac{W_a}{T_{в.а}}$$

Число годин  $T_{в.а}$  використання максимуму навантаження приймають за даними довідника, які одержані на підставі дослідних даних для підприємств аналогічного типу за технологією та організацією робіт. Коефіцієнт заповнення графіка на підставі тієї ж формули може бути знайдений з виразу

$$K_{\Sigma.a} = \frac{T_{\Sigma.a}}{T},$$

де  $T$  — відрізок часу, для якого визначена витрата енергії  $W_a$ .

Ті ж показники для графіка реактивного навантаження можуть бути знайдені за аналогічними формулами або ж за формулами

$$Q_M = P_M \operatorname{tg} \varphi_M, \quad K_{\Sigma.P} = \frac{W_P}{Q_M T},$$

де  $W_P$  — витрата реактивної енергії.

Внаслідок того, що число годин використання максимуму навантаження має стійке значення тільки для підприємства в цілому, описана методика придатна лише для орієнтовних розрахунків загального навантаження по підприємству.

## 6. Визначення розрахункових величин по методу коефіцієнта попиту.

Визначення розрахункових максимумів активного навантаження для окремих груп споживачів, з'єднаних технологічним процесом або цехом, проводять за виразом

$$P_M = K_{\Sigma.a} \sum_{k=1}^n P_{Mk}.$$

Розрахункове навантаження вузла системи електропостачання, від якого живляться декілька груп споживачів, визначається з урахуванням коефіцієнта поєднання максимумів  $K_{\Sigma.M}$  навантажень окремих груп споживачів за формулою

$$P_{M\gamma} = K_{\Sigma.M} \sum_{k=1}^n P_{Mk}.$$

При визначенні сумарного навантаження головної знижувальної підстанції або центрального розподільного пункту вводять додатковий коефіцієнт участі в максимумі  $K_{y.M}$ .

$$P_{M\Sigma} = K_{y.M} \sum_{k=1}^n P_{M\gamma k}.$$

Можливе також визначення розрахункового максимуму навантаження по укрупнених показниках, виходячи з сумарної встановленої потужності приєднаних до підстанції або розподільного пункту споживачів, за наявності відомостей про укрупнені коефіцієнти попиту.

Коефіцієнт попиту приймають за даними довідників, що одержані на підставі експериментальних робіт. Оскільки значення коефіцієнтів попиту в довідниках, що рекомендуються, даються для якихось середніх умов, метод не відрізняється великою точністю.

Прагненням уточнити значення коефіцієнтів попиту пояснюється поява методів визначення очікуваних значень коефіцієнтів попиту залежно від чинників, що впливають на нього.

## 7. Розрахунок електричних навантажень за коефіцієнтами використання та максимуми.

Метод є в даний час основним при розробці технічних та робочих проектів електропостачання. Згідно з цим методом розрахункове максимальне навантаження групи електроприймачів

$$P_M = K_M K_\phi P_H = K_M P_{CM}.$$

Тут групова номінальна потужність  $P_H$  визначається як сума номінальних потужностей електроприймачів, за винятком резервних.

Для групи електроприймачів одного режиму роботи середні активна та реактивна навантаження за саму завантажену зміну визначаються за формулами:

$$P_{CM} = K_\phi P_H \quad Q_{CM} = P_{CM} \operatorname{tg} \phi$$

де  $\operatorname{tg} \phi$  — відповідає середньовзваженому  $\cos \phi$ , характерному для електроприймачів даного режиму роботи (див. табл. 1). За наявності в групі електроприймачів різних режимів роботи вирази змінюються:

$$P_{CM} = \sum p_{CM} = \sum k_\phi P_H \quad Q_{CM} = \sum q_{CM} = \sum p_{CM} \operatorname{tg} \phi.$$

Коефіцієнт максимуму активної потужності  $K_M$  визначається за довідковими таблицями залежно від ефективного числа електроприймачів групи  $n_e$  (табл. 1) або за діаграмою, яка приведена на рис. 4, залежно від величини групового коефіцієнта використання  $K_B$ , і  $n_e$ .

Ефективним (приведеним) числом електроприймачів  $n_e$  називається таке число однорідних за режимом роботи електроприймачів однакової потужності, яке дає ту ж величину розрахункового максимуму  $P_M$ , що і група електроприймачів, різних за потужністю та режиму роботи. Ефективна кількість електроприймачів

$$n_e = \frac{\left[ \sum_1^n P_H \right]^2}{\sum_1^n P_H^2}.$$

При числі електроприймачів в групі чотири та більш допускається приймати  $n_e$  рівним  $n$  (дійсному числу електроприймачів) за умови, що відношення номінальної потужності найбільшого електроприймача до номінальної потужності найменшого

$$m = \frac{P_{H.\text{макс}}}{P_{H.\text{мін}}} < 3$$

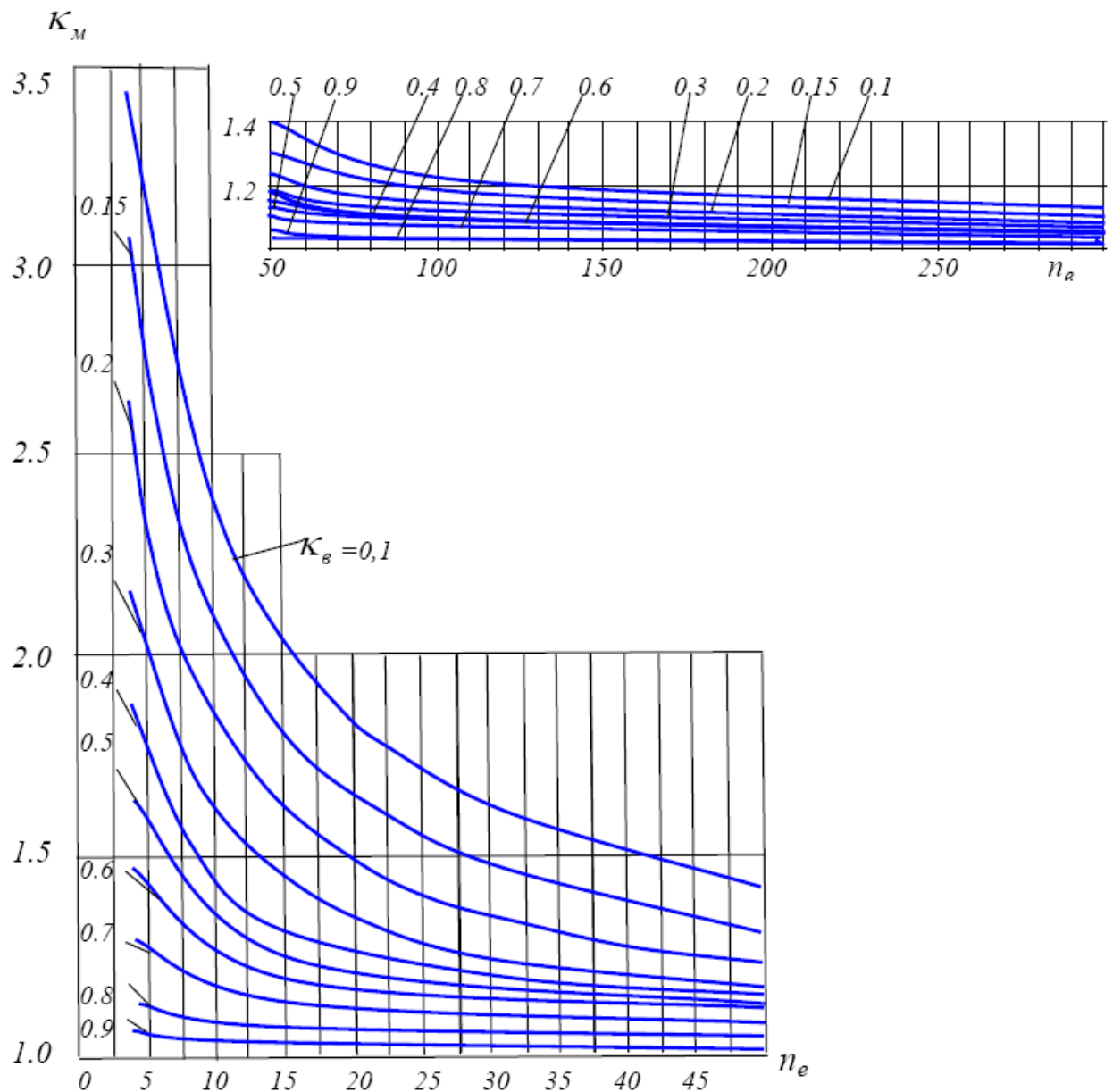


Таблиця 1

$n_e$	$K_b = 0,1$	$K_b = 0,15$	$K_b = 0,2$	$K_b = 0,3$	$K_b = 0,4$	$K_b = 0,5$	$K_b = 0,6$	$K_b = 0,7$	$K_b = 0,8$	$K_b = 0,9$
4	3,43	3,11	2,64	2,14	1,87	1,65	1,46	1,29	1,14	1,05
5	3,23	2,87	2,42	2	1,76	1,57	1,41	1,26	1,12	1,04
6	3,04	2,64	2,24	1,88	1,66	1,51	1,37	1,23	1,1	1,04
7	2,88	2,48	2,1	1,8	1,58	1,45	1,33	1,21	1,09	1,04
8	2,72	2,31	1,99	1,72	1,52	1,4	1,3	1,2	1,08	1,03
9	2,56	2,2	1,9	1,65	1,47	1,37	1,28	1,18	1,08	1,03
10	2,42	2,1	1,84	1,6	1,43	1,34	1,26	1,16	1,07	1,03
12	2,24	1,96	1,75	1,52	1,36	1,28	1,23	1,15	1,07	1,03
16	1,99	1,77	1,61	1,41	1,28	1,23	1,18	1,12	1,07	1,03
20	1,84	1,65	1,5	1,34	1,24	1,2	1,15	1,11	1,06	1,03
25	1,71	1,55	1,4	1,28	1,21	1,17	1,14	1,1	1,06	1,03
30	1,62	1,46	1,34	1,24	1,19	1,16	1,13	1,1	1,05	1,02
40	1,5	1,37	1,27	1,19	1,15	1,13	1,12	1,09	1,05	1,02
50	1,4	1,3	1,23	1,16	1,14	1,11	1,1	1,08	1,04	1,02
60	1,32	1,25	1,19	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,03	1,02
80	1,25	1,2	1,15	1,11	1,1	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02
100	1,21	1,17	1,12	1,1	1,08	1,08	1,07	1,05	1,02	1,02
140	1,17	1,15	1,11	1,08	1,06	1,06	1,06	1,05	1,02	1,02
200	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,05	1,05	1,04	1,01	1,01
240	1,14	1,11	1,08	1,07	1,05	1,05	1,05	1,03	1,01	1,01
300	1,12	1,1	1,07	1,06	1,04	1,04	1,04	1,03	1,01	1,01

При визначенні  $m$  допускається виключати дрібні електроприймачі, сумарна потужність яких не перевищує 5% номінальної потужності всієї групи. У разі, коли величина  $m$  перевищує три, а підрахунок за формулою стає важким через велику кількість різноманітних електроприймачів, величину не визначають, використовуючи графіки, приведені на рис. 5, за якими знаходять допоміжну величину  $n_{e*}$  — відносну ефективну кількість електроприймачів, що дорівнює відношенню  $n_e/n$ . Знаючи  $n_{e*}$  і  $n$  визначають

$$n_e = n_{e*} \cdot n.$$

Рисунок - 4. Залежності  $K_B$  та  $K_M$  від  $n_e$ 

Значення  $n_e^*$  знаходяться в залежності ще від двох допоміжних величин  $n^*$  та  $P^*$ :

$$n_* = n_1 / n,$$

де  $n_1$  — число великих електроприймачів в групі, потужність кожного з яких не менше половини потужності найбільшого електроприймача:

$$P_* = P_{n1} / P_n,$$

де  $P_{n1}$  — сумарна номінальна потужність цих великих електроприймачів;  $P_n$  — сумарна номінальна потужність всієї групи.

Відповідно до практики проектування систем електропостачання встановлено, що:

а) при  $m > 3$  і  $k_B > 0,2$  ефективне число електроприймачів

$$n_e = 2P_{n\Sigma} / P_{M1},$$

де  $P_H$  — сумарна номінальна потужність групи електроприймачів;  
 $P_{H1}$  — потужність одного найбільшого електроприймача групи.

У тих випадках, коли  $n_e > n$  слід приймати  $n_e = n$

б) при  $n > 3$  і  $n_e < 4$  розрахункове максимальне навантаження

приймається  $P_M = k_z \sum P_H$ , де  $k_z$  — коефіцієнт завантаження, рівний 0,9 для тривалого режиму і 0,75 — для режиму ТВ.

Для електроприймачів з практично постійним графіком навантаження величина  $K_M$  приймається рівній одиниці та максимальна розрахункова потужність навантаження визначається за середньою потужністю навантаження за саму завантажену зміну

$$P_M = P_{CM} = K_{\Sigma} P_H$$

Реактивна максимальна розрахункова потужність групи електроприймачів з різними режимами роботи

$$Q_M = K_M Q_{CM}.$$

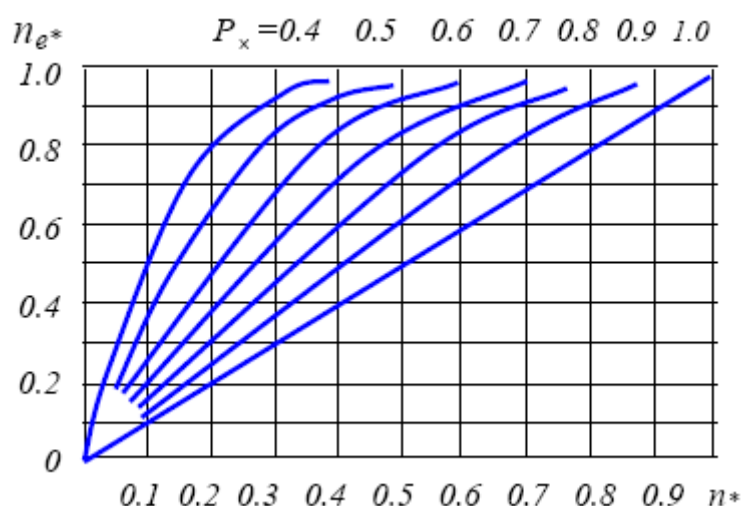


Рисунок - 5. Залежності  $n_e$  від  $n$  при різних відносних навантаженнях

Відповідно до практики проектування приймають:

$$Q_M = 1,1 Q_{CM} \text{ при } n_e \leq 10;$$

$$Q_M = Q_{CM} \text{ при } n_e > 10.$$

Якщо в групі електроприймачів цеху або підприємства є електроприймачі, що працюють з випереджаючим струмом, їх реактивні потужності  $Q_c$  приймаються із знаком мінус і віднімаються із загальної реактивної потужності.

Після визначення  $P_M$  і  $Q_M$  може бути підрахована повна потужність

$$S_M = \sqrt{P_M^2 + (Q_M - Q_c)^2}.$$

Розрахунковий максимальний струм для електроприймачів змінного струму

$$I_{\text{м}} = P_{\text{м}} / (\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{м}});$$

для електроприймачів постійного струму

$$I_{\text{м}} = P_{\text{м}} / U.$$

Слід зазначити, що розрахунок навантажень не може бути достатньо точним через можливі зміни початкових даних і неточності розрахункових коефіцієнтів (враховуючи динаміку зміни коефіцієнта в часі). Тому при розрахунку навантажень припускається похибки  $\pm 10\%$ .

Розрахунок електричних навантажень однофазних електроприймачів.

Однофазні електроприймачі, які включені на фазні та між фазні напруги й розподілені по фазах з нерівномірністю не вище 15%, враховуються як трифазні тієї ж сумарної потужності. При перевищенні вказаної нерівномірності розрахункове навантаження однофазних електроприймачів приймається рівним потрійній величині навантаження найбільш завантаженої фази.

При кількості однофазних електроприймачів до трьох умовна трифазна номінальна потужність  $P_{\text{ном.у}}$  визначається наступним способом:

а) при включенні електроприймачів на фазну напругу

$$P_{\text{н.у}} = 3 S_{\text{пв}} \sqrt{TB} \cos \varphi = 3 P_{\text{н.ф}}$$

де  $S_{\text{пв}}$  — паспортна потужність;  $P_{\text{н.ф}}$  — номінальна потужність максимально навантаженої фази;

б) при включенні однофазних електроприймачів на лінійну напругу при одному електроприймачі

$$P_{\text{н.у}} = \sqrt{3} P_{\text{н}};$$

при двох-трьох електроприймачах

$$P_{\text{н.у}} = 3 P_{\text{н.ф}}.$$

Максимальне навантаження однофазних електроприймачів, включених на фазну або лінійну напругу при числі їх більше три при однаковому  $K_{\text{в}}$  і  $\cos \varphi$ , визначається по формулах:

$$P_{\text{м}} = K_{\text{в}} K_{\text{м}} P_{\text{н.ф}}$$

$$Q_{\text{м}} = 1,1 K_{\text{в}} Q_{\text{н.ф}}.$$

## 8. Визначення витрат електроенергії та втрат.

Початковими величинами для визначення витрати електроенергії є питомі технологічні норми електроспоживання, тобто питомі витрати електроенергії по кожному технологічному процесу, віднесені до характерного для даного процесу одиничного вимірника. Наприклад, для

екскаваторів питома технологічна норма електроспоживання подається в кВт.год на 1 м<sup>3</sup> вийнятої маси, для насосних установок — в кВт.год на 1 т.км речовини, яка транспортується, тощо. Питомі технологічні норми витрати електроенергії, що приводяться в довідниках, визначаються розрахунковим або експериментальним шляхом.

Визначення загальної витрати активної енергії за який-небудь проміжок часу (доба, місяць, рік) за наявності відомостей про питомі технологічні витрати електроенергії виконують за формулою

$$W_a = \sum_{k=1}^n \omega_k M_k$$

де  $\omega_k$  — питома технологічна витрата активної енергії по виробничому процесу;  $M_k$  — продуктивність виробничого процесу у властивих йому одиницях за період часу, для якого визначається витрата енергії;  $n$  — число виробничих процесів на підприємстві. Визначення загальних витрат реактивної енергії виконують за формулою

$$W_P = \sum_{k=1}^n \omega_k M_k \operatorname{tg} \varphi_k$$

де  $\operatorname{tg} \varphi_k$  відповідає відношенню споживання реактивної енергії до споживання активної енергії, знайденого розрахунковим або експериментальним шляхом.

Для визначення повних витрат електроенергії необхідно врахувати також втрати активної і реактивної енергії в лініях, трансформаторах і реакторах.

Для попередніх розрахунків витрату електроенергії допустимо визначати за формулою

$$W_a = \omega_{cp} M_{\Sigma}$$

де  $\omega_{cp}$  — питома витрата електроенергії на одиницю продукції, що випускається підприємством;  $M_{\Sigma}$  — продукція підприємства за період часу, для якого визначається витрата енергії.

Щоб уникнути великих похибок питома витрата електроенергії повинна прийматися за даними для діючих підприємств, близьких по продуктивності та технології. Для визначення повної витрати електроенергії необхідно врахувати також втрати активної та реактивної енергії в лініях, трансформаторах і реакторах.

Втрати потужності в окремих елементах схеми електропостачання враховують не тільки при визначенні розрахункових навантажень, але і при виборі варіантів електропостачання з урахуванням економічних чинників. Слід зазначити, що в практичних розрахунках втрати потужності та енергії в повітряних і кабельних лініях враховуються лише при техніко-економічних порівняннях варіантів схем і при виборі напруги. При визначенні

електричних навантажень втрати в цих елементах схеми не розраховуються, оскільки вони враховані числовими значеннями коефіцієнтів використання й попиту.

Втрати потужності в трансформаторах і реакторах визначаються по приведених нижче виразах і підсумовуються з розрахунковими значеннями навантажень на шинах РУ – 6(10) кВ.

Повні втрати активної та реактивної потужності в лініях виражаються відповідно до формул:

$$\Delta P_a = 3I_m^2 R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт};$$

$$\Delta Q = 3I_m^2 X \cdot 10^{-3}, \text{ квар.}$$

Тут  $R$  і  $X$  — повний активний та реактивний опір лінії.

Втрати активної потужності в лінії при передачі по ній реактивної потужності виражаються формулою

$$\Delta P_P = 3(I_m \sin \varphi)^2 R = \frac{Q_m^2}{U_n^2} R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.}$$

Тоді

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_P, \text{ кВт.}$$

Втрати активної та реактивної енергії при змінному навантаженні виражаються відповідно формулами:

$$\Delta W = \Delta P_a \tau_a + \Delta P_P \tau_P, \text{ кВт} \cdot \text{год.};$$

$$\Delta V = \Delta Q \tau_P \text{ квар} \cdot \text{год.},$$

де  $\tau_a$  і  $\tau_P$  — число годин максимуму втрат, відповідно по активній та реактивній потужності, визначуване з достатньою для практичних цілей точністю за виразами:

$$\tau_a = (0,124 + T_m \cdot 10^{-4})^2 8760, \text{ год};$$

$$\tau_P = (0,124 + T_{m,P} \cdot 10^{-4})^2 8760, \text{ год.}$$

Втрати активної та реактивної потужності в трансформаторах визначаються відповідно до наступних формул:

$$\Delta P = P_{x.x} + \beta_T^2 \Delta P_m, \text{ кВт}; \quad \Delta Q = \Delta Q_{x.x} + \beta_T^2 \Delta Q_m, \text{ квар},$$

де  $\Delta P_{x.x}$  і  $\Delta P_m$  — активные втрати холостого ходу та втрати в міді при номінальному навантаженні

$$\beta_T = \frac{S_m}{S_n}$$

— коефіцієнт завантаження трансформатора;  $Q_{x.x}$  — реактивні втрати холостого ходу, величина яких, що виражена у відносних

одиницях, чисельно рівна струму холостого ходу;  $\Delta Q_m$  — реактивні втрати в обмотках трансформатора, які у відносних одиницях чисельно дорівнюють напрузі КЗ.

До остаточного вибору потужності трансформаторів втрати в них можна приймати орієнтовно:

$$\Delta P = 0,02 S_{н.н}; \quad \Delta Q = 0,1 S_{н.н}$$

де  $S_{н.н}$  — розрахункова потужність на шинах низької напруги.

Втрати активної та реактивної енергії в трансформаторах визначають відповідно виразами:

$$\Delta W_a = \Delta P_{x.x} T_e + \beta_T^2 \Delta P_m \tau_a, \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$\Delta W_p = \Delta Q_{x.x} T_e + \beta_T^2 \Delta Q_m \tau_p, \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Втрати активної та реактивної потужності в реакторах визначаються відповідно до формул:

$$\Delta P = 3 \beta_p^2 \Delta P_n, \text{ кВт}; \quad \Delta Q = 3 \beta_p^2 \Delta Q_n, \text{ квар}$$

де  $\Delta P_n$  і  $\Delta Q_n$  — активні та реактивні втрати потужності в одній фазі реактора при номінальному його навантаженні;  $\beta_p$  — коефіцієнт завантаження реактора.

Втрати активної і реактивної енергії в реакторах:

$$\Delta W_a = \Delta P \tau_a, \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad \Delta W_p = \Delta Q \tau_a, \text{ квар} \cdot \text{год}.$$

### Контрольні питання

1. Як пов'язані активна, реактивна складові та повна потужність?
2. Середні навантаження.
3. Розрахункове максимальне навантаження.
4. Графіки електричних навантажень та їх характеристики.
5. Які основні показники характеризують графіки електричних навантажень?
6. Назвіть відомі вам Методи розрахунку електричних навантажень.
7. З якою метою використовуються максимальні значення навантажень?
8. Метод впорядкованих діаграм (за коефіцієнтами використання та максимуму).
9. Розрахунок електричних навантажень однофазних електроприймачів.
10. Визначення втрат потужності та електроенергії в елементах мережі.