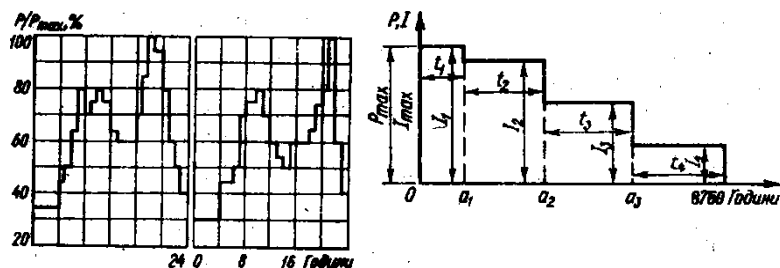


Тема 1.4. Графіки навантаження і втрати електроенергії в електричних мережах

1. Загальні відомості про графіки навантажень.
2. Визначення втрат електроенергії в проводах і трансформаторах.
3. Економічна густина струму в провідниках.

1. Режим роботи окремих споживачів і їх груп у цілому не залишається сталим, їх потужність змінюється протягом доби, місяця й сезону. Освітлювальне навантаження, наприклад, максимальне у вечірні години, причому взимку тривалість його більша, ніж улітку. Змінюється в часі і силове навантаження. Тому навантаження електростанцій або трансформаторних підстанцій, потужність яких визначається сумарною потужністю споживачів, також змінюватиметься.



а

б

Мал. 4.2. Річний графік

Мал.4.1. Зимовий(а) і літній(б) навантаження за тривалістю добові графіки навантаження

Характеристику навантаження можна показати графічно. Якщо на осі

абсцис відкласти години доби, а на осі ординат — відповідні їм навантаження, то дістанемо криву, яка називається *добовим графіком навантаження* (мал.4.1.). З графіка видно, що максимальне навантаження взимку буде між 18 і 20 годинами, а влітку - між 20 і 23 годинами. Узимку максимум навантаження настає раніше і значно більший, ніж улітку; денний зимовий мінімум навантаження також дещо більший.

Розрізняють, крім добових, *тижневі, сезонні й річні* графіки навантаження. За видом навантаження бувають графіки *активного і реактивного* навантаження. На осі ординат можна відкладати навантаження як в одиницях потужності, так і в одиницях струму. Зміну навантаження за часом зображають суцільною плавною кривою або ламаною, що складається з окремих прямих ліній. Найбільш поширені графіки, в яких горизонтальними лініями нанесено середні навантаження за проміжок часу, для якого визначається зміна потужності або струму (наприклад, за годину).

Користуючись графіками навантаження, можна проаналізувати роботу електростанції, підстанції чи окремого споживача, визначити ступінь завантаження агрегатів і можливість найраціональнішого розподілу навантаження між окремими агрегатами.

Аналіз режимів електроспоживання краще виконувати на підставі добових графіків навантаження. Для побудови добових графіків навантаження енергосистеми знімають покази два рази на рік у характерні дні, звичайно в третій декадах червня і грудня, для активного і реактивного навантаження.

За даними добових графіків навантаження зими і літа можна побудувати річний графік за тривалістю. Для цього визначають спочатку тривалість сезону (річну кількість днів поділяють на зимовий і літній періоди: для зимового періоду можна прийняти 200 днів, а для літнього -165). Потім, визначивши загальну добову тривалість якого-не-будь навантаження, наприклад максимального, і перемноживши це число годин на кількість днів сезону, визначають тривалість цього навантаження протягом сезону в

годинах. Такі розрахунки повторюють для кожного наступного спадного навантаження. Дані розрахунків переносять на графік, в якому на осі ординат послідовно в спадному порядку проставляють навантаження, а на осі абсцис — їх тривалість у годинах. Підсумовуючи абсциси літнього і зимового графіків для однакових навантажень, визначають тривалість навантаження за рік. Такий графік називається *річним графіком за тривалістю* (мал.4.2.).

Іншою формою річного навантаження є *річний графік максимумів навантаження*. У ньому на осі абсцис відкладають дні року або місяці в календарному порядку, а на осі ординат — відповідно максимальні навантаження. Для цього графіка характерні спад у літні місяці (зменшується освітлювальне навантаження) і збільшення в кінці року, зумовлені приєднанням нових споживачів.

Річні графіки потрібні для визначення належної кількості палива на теплових електростаціях, раціонального розподілу навантаження між генераторами або електростанціями, які працюють паралельно.

Режими електроспоживання характеризуються рядом показників найважливіші з яких: коефіцієнт заповнення добового графіка навантаження, кількість годин використання максимального навантаження, відношення нічного й денного мінімумів навантаження до вечірнього максимуму навантаження.

На підставі графіків навантаження можна визначити коефіцієнти, що характеризують роботу, економічність і деякі інші показники електроустановки.

1. Середньодобова і середньорічна потужність:

$$P_{cp} = \frac{W}{t} \quad (4.1)$$

де W — кількість електроенергії, витраченої за t годин роботи

електроустановки. Вона визначається як площа графіка, обмежена координатами потужності і часу та кривою графіка за t годин (див. мал.4.2.)

2. Кількість годин використання максимуму навантаження:

$$T_{\max} = \frac{W}{P_{\max}} \quad (4.2)$$

де $P_{\max}$ – максимальне навантаження за певний період.

3. Коефіцієнт заповнення графіка навантаження (коефіцієнт завантаження):

$$k_{zan} = \frac{P_{cp}}{P_{\max}} \quad (4.3)$$

Цей коефіцієнт називають ще *коефіцієнтом рівномірності навантаження*. Треба прагнути до максимального збільшення коефіцієнта рівномірності, тому що при цьому краще використовуються генератори і трансформатори, більше виробляється електроенергії, а отже, знижується її собівартість.

4. Коефіцієнт резерву:

$$k_{рез} = \frac{P_{уст}}{P_{\max}} \quad (4.4)$$

де $P_{уст}$ – установлена потужність установки.

Коефіцієнт резерву майже завжди більший за одиницю і залежить від-призначення та важливості установки.

Бувають випадки, коли $k_{рез} < 1$. Наприклад при роботі окремого трансформатора КТП у відповідності з ГОСТ допускається аварійне

перевантаження на 30 % більше номінального струму протягом 3 годин за добу, якщо попереднє навантаження було не більше 70 % номінального. При цьому коефіцієнт резерву буде меншим від одиниці, тобто поняття резерву втрачає своє значення.

5. Коефіцієнт попиту:

$$k_n = \frac{P_{\max}}{P_{\text{уст}}} = \frac{1}{k_{\text{рез}}} \quad (4.5)$$

Коефіцієнт попиту використовується при визначенні максимального навантаження. Ним ураховують одночасні роботи (k_o), коефіцієнт завантаження (k_z) і середній ККД споживачів (η).

Оскільки:

$$P_{\max} = P_{\text{уст}} \frac{k_o \cdot k_z}{\eta} \quad (4.6)$$

$$P_{\max} = P_{\text{уст}} \cdot k_z \quad (4.7)$$

маємо:

$$k_n = \frac{k_o k_z}{\eta} \quad (4.8)$$

Коефіцієнт попиту менший від одиниці. Для внутрішнього освітлення беруть $k_n = 0,4 \dots 0,8$, а для силового навантаження – $k_n = 0,2 \dots 0,7$.

Слід мати на увазі, що при визначенні максимального навантаження групи робочих електроприймачів необхідно враховувати коефіцієнт участі в максимумі:

$$k_{\Sigma} = \frac{P_{\max \Sigma}}{\sum P_{\max}}$$

де $P_{\max \Sigma}$ - максимальне навантаження групи робочих електроприймачів;

$\sum P_{\max}$ – сума максимумів окремих робочих електроприймачів.

Зміна навантаження електростанції і підстанцій протягом доби завжди рівномірніша, ніж для окремих груп, споживачів. Чим різноманітніші навантаження споживачів, тим рівномірніший режим роботи (а отже, і графік навантаження) джерела живлення, тим повніше і рівномірніше використовуються агрегати, тим вищі економічні показники роботи електроустановок.

Поряд з регулюванням добових графіків навантаження, велике значення мають заходи щодо зниження піків навантаження. Споживання електроенергії в сільському господарстві має різко виявлений піковий характер, що помітно впливає на зростання абсолютних і відносних піків навантаження електростанцій і підстанцій. При регулюванні добових графіків навантаження треба перевести енергоємких споживачів, які працюють періодично (млини, пилорами, електротеплові установки, що працюють за принципом акумулювання теплоти), з годин максимуму на інші години доби. Економічна зацікавленість підприємств у перенесенні навантаження стимулюється системою різних діючих тарифів на електроенергію.

2. За добовими і річними навантаженнями легко визначити кількість енергії, що витрачається при роботі електроустановки за добу чи за рік. Якби потужність установки не змінювалась, то кількість енергії W , що витрачається за час t , становила б:

$$W = P \cdot t \quad (4.9)$$

Але, оскільки навантаження весь час змінюється, то:

$$W = P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + \dots P_n t_n \quad (4.10)$$

де $P_1, P_2, P_3, \dots P_n$ – навантаження протягом відповідних проміжків часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$.

Для зручності розрахунків графік зображають ступінчастим, беручи ординату ступеня такою, що дорівнює середній потужності за проміжок часу ступеня.

Рівняння (4.10) можна записати в інтегральній формі:

$$W = \int_0^t P dt \quad (4.11)$$

Інтегрування за рівнянням (4.11) ускладнюється, бо рівняння зміни навантаження за часом $P=f(t)$ математично записати важко.

Якщо графіка навантаження немає, то енергію можна обчислити за максимальним навантаженням $P_{\max}$ і кількістю годин використання максимуму навантаження $T_{\max}$.

Під *тривалістю використання максимуму навантаження* $T_{\max}$ розуміють кількість годин роботи електроустановки, протягом яких установка, працюючи з максимальним навантаженням $P_{\max}$, мала б таку витрату енергії, яку вона має при роботі за дійсним графіком.

Визначення $T_{\max}$ можна пояснити на графіку. Нехай графік (мал.4.3.) буде дійсним річним графіком навантаження за тривалістю. Тоді енергія, що витрачається за рік, визначається площею ОАВС. Побудуємо прямокутник ОАВ'С', в якого одна із сторін є $P_{\max}$, а площа дорівнює площі АОВС. Друга сторона - $T_{\max}$ - показуватиме кількість годин використання максимуму навантаження. У відповідності до малюнка можна записати:

$$W_{\max} = P_{\max} t_{\max} \quad (4.12)$$

У рівняннях (4.11) і (4.12) ліві частини однакові, тому

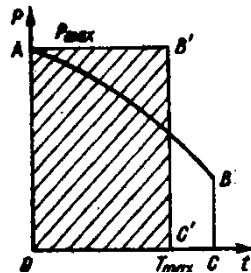
$$P_{\max} T_{\max} = \int_0^t P dt \quad (4.13)$$

звідки:

$$T_{\max} = \frac{\int_0^t P dt}{P_{\max}}$$

(4.14)

тобто, $T_{\max}$ визначається відношенням площі, обмеженої дійсним графіком навантаження, до ординати, яка відповідає найбільшій потужності навантаження $P_{\max}$.



Мал.4.3. До визначення часу використання потужності

Підставивши рівняння (4.10) в рівняння (4.12), дістанемо:

$$T_{\max} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + \dots + P_n t_n}{P_{\max}}$$

На підставі статистичних даних можна назвати межі $T_{\max}$ протягом року для окремих груп споживачів: внутрішнє освітлення і побутові прилади — 2000...3000 год, сільськогосподарські і однозмінні промислові підприємства — 1500...2200 год, підприємства, що працюють у дві зміни,—3000...5000 год, у три зміни — 5000...7000 год.

Для повної характеристики навантаження можна аналогічно

проаналізувати графік реактивної потужності. При проектуванні реактивну потужність ураховують наближено. При цьому користуються коефіцієнтом потужності ($\cos \phi$), значення якого беруть незмінним.

При проходженні електричного струму по проводах, кабелях, обмотках трансформаторів та інших апаратах частина потужності втрачається на їх нагрівання. Щоб скомпенсувати ці втрати, треба збільшувати потужність джерела живлення, що пов'язано з витратами палива і додатковими капіталовкладеннями.

Втрати потужності і енергії можна зменшити, збільшивши переріз проводів, але це призведе до збільшення затрат металу для спорудження електричних мереж, виготовлення трансформаторів тощо. Тому при проектуванні електричних мереж, крім вартості проводів, слід враховувати вартість втраченої електроенергії.

Оскільки втрачена енергія іде на нагрівання, за законом Джоуля — Ленца у системі одиниць СІ можна записати:

$$\Delta W = Q_t = I^2 R t = \Delta P t, \quad (4.15)$$

де ΔW — втрата електроенергії, кВт · год; $\Delta P t$ — втрата потужності, яка протягом часу t не змінюється, кВт.

Рівняння (4.15) справедливе лише тоді, коли навантаження не змінюється.

Втрати потужності й енергії в лінії пропорційні квадрату струму, що по ній проходить.

Оскільки:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \phi} \quad (4.16)$$

беручи напругу і коефіцієнт

потужності $\cos \phi$ незмінними, можна вважати, що втрати потужності й енергії в лінії пропорційні квадрату потужності, яка передається по лінії.

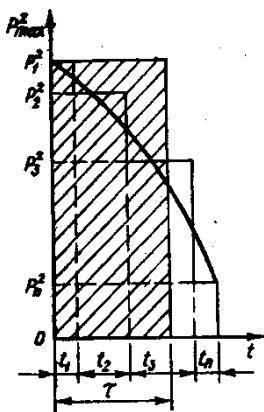
Якби потужність протягом часу t не змінювалась, то втрата енергії:

$$\Delta W = \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \phi} \right)^2 R t \quad (4.17)$$

а втрата потужності:

$$\Delta P = \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \phi} \right)^2 R$$

Проте навантаження безперервно змінюється як протягом доби, так і протягом окремих сезонів залежно від режиму роботи споживачів. Для обчислення втрати енергії в лінії із змінним навантаженням можна використати графіки навантаження.



Мал.4.4. До визначення часу втрати електроенергії

Користуючись річним графіком за тривалістю, можна побудувати графік тривалості квадрата навантаження (мал. 4.4.). Для цього навантаження, що відповідає певному часу, треба піднести до квадрата і відкласти на осі ординат.

Площа, обмежена цим графіком і осями координат, пропорційна втраті енергії в лінії:

$$\Delta W = (P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots + P_n^2 t_n) \frac{R}{(\sqrt{3}U \cos \varphi)^2} \quad (4.18)$$

При безмежно великій кількості ступенів часу рівняння (4.18) можна записати в інтегральній формі:

$$\Delta W = \frac{R}{(\sqrt{3}U \cos \varphi)^2} \int_0^t P^2 dt \quad (4.19)$$

Як і в попередньому випадку, побудуємо прямокутник з висотою, що дорівнює квадрату максимального навантаження $P_{\max}^2$ і площею, що дорівнює площі, обмеженій графіком і осями (мал.4.3., б). За побудовою:

$$\Delta W = \frac{R}{(\sqrt{3}U \cos \varphi)^2} P_{\max}^2 \tau \quad (4.20)$$

Абсциса τ називається *часом витрат* і означає такий проміжок часу, протягом якого при проходженні по лінії максимального навантаження $P_{\max}$ втрати енергії дорівнювали б дійсним втратам за рік при роботі електроустановки за дійсним графіком навантаження.

Підставивши рівняння (4.18) у формулу (4.20), матимемо:

$$P_{\max}^2 \tau = (P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots P_n^2 t_n) \quad (4.21)$$

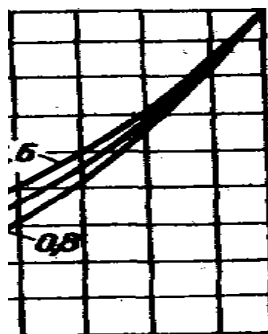
звідки

$$\tau = \frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots P_n^2 t_n}{P_{\max}^2}$$

Аналогічно з рівнянь (4.19) і (4.20) дістанемо:

$$\tau = \frac{\int_0^t P^2 dt}{P_{\max}^2}$$

Час втрат τ знаходять з рівнянь (4.21) або (4.22) на підставі графіків навантаження. Якщо графіків навантаження немає, то час втрат τ визначають за графіком залежно від тривалості використання найбільшого навантаження $T_{\max}$ (мал.4.5.) побудованим для промислового навантаження за теоретичними кривими зміни потужності. Для сільських мереж вони можуть бути використані лише для попередньої оцінки втрати енергії.



Мал.4.5. Залежність $\tau = f(T)$ при різних $\cos \phi$

У практичних розрахунках можна користуватися рівнянням:

$$\tau = 0,69T_{\max} - 584 \quad (4.23)$$

Це рівняння складене на підставі аналізу великої кількості графіків навантаження сільських споживачів і може бути використане при зміні $T_{\max}$ в межах 2500...4400 год/рік.

Аналіз кривих (мал. 4.5.) показує, що з підвищенням коефіцієнта потужності $\cos \phi$ для заданих $T_{\max}$ час втрат зменшується, а з рівнянь (4.19) і (4.20) видно, що втрати потужності енергії обернено пропорційні квадрату коефіцієнта потужності $\cos \phi$:

$$\Delta W \equiv \Delta P = \frac{D}{\cos^2 \phi} \quad (4.24)$$

де D — відповідний множник.

Втрати потужності в лінії можна обчислити для певного моменту навантаження. Навантаження лінії можна визначити не потужністю, а розрахунковим струмом; тоді втрати активної потужності в лініях трифазного струму (кВт):

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 I^2 R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} \quad (4.25)$$

де I — розрахунковий струм певної ділянки в лінії в певний проміжок часу, А
 $R_{\text{л}}$ — активний опір цієї ділянки лінії, Ом.

Відповідно втрати реактивної потужності (квар):

$$\Delta Q_{\text{л}} = 3 I^2 X_{\text{л}} \cdot 10^{-3} \quad (4.26)$$

де $X_{\text{л}}$ - реактивний опір певної ділянки лінії, Ом.

Іноді втрати потужності в лінії визначають у процентах розрахункової потужності:

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 \quad (4.27)$$

Втрати активної потужності в трансформаторах визначаються постійними втратами в сталі $P_{\text{х}}$ (втрати холостого ходу) і втратами в обмотках трансформатора $\Delta P_{\text{к}}$ (втрати короткого замикання).

Втрати $\Delta P_{\text{х}}$ не залежать від струму навантаження, вони викликають нагрівання сталюого магнітопровода при перемагнічуванні і вихровими струмами. Втрати $\Delta P_{\text{к}}$ залежать від струму навантаження і викликають нагрівання обмоток трансформатора, вони визначаються опором обмоток і струмом навантаження.

При номінальній потужності:

$$\Delta P_{\text{к}} = 3 I_{\text{ном}}^2 R_{\text{т}} \cdot 10^{-3} \quad (4.28)$$

а при довільній потужності:

$$\Delta P = 3 I^2 R_{\text{т}} \cdot 10^{-3} \quad (4.29)$$

Поділивши рівняння (4.29) на рівняння (4.28), матимемо:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{к}}} = \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (4.30)$$

звідки:

$$\Delta P = \Delta P_{\kappa} \left(\frac{I}{I_{ном}} \right)^2 \quad (4.31)$$

Якщо в рівняння (4.31) підставити $I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$, а $I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U}$, матимемо:

$$\Delta P = \Delta P_{\kappa} \left(\frac{S}{S_{ном}} \right)^2 \quad (4.32)$$

Відношення струмів або потужностей у рівняннях (4.30) ... (4.32) визначає коефіцієнт завантаження трансформатора β .

Отже, повна втрата активної потужності в трансформаторі (кВт):

$$\Delta P_{\tau} = (\Delta P_{\kappa} + \beta^2 \Delta P_{\kappa}) \quad (4.33)$$

Втрати реактивної потужності в трансформаторі складаються з втрат на намагнічування ΔQ_{μ} , які практично не залежать від навантаження, і реактивних втрат потужності в обмотці ΔQ_p :

$$\Delta Q_{\tau} = \Delta Q_{\mu} + \beta^2 \Delta Q_p \quad (4.34)$$

Втрати реактивної потужності на намагнічування (квар) можна обчислити за рівнянням:

$$\Delta Q_{\mu} \cong \frac{I_x S_{ном}}{100} \quad (4.35)$$

Втрата реактивної потужності в обмотках, зумовлена потоками розсіювання, залежить від навантаження. При номінальній потужності

трансформатора:

$$\Delta Q_p \cong \frac{U_k S_{ном}}{100} \quad (4.36)$$

де ΔQ_p – втрата реактивної потужності на розсіювання при номінальній потужності трансформатора, квар; U_k – напруга короткого замикання, %.

Втрати електроенергії в трансформаторах визначають за втратами потужності як суму втрат в сталі і в обмотках:

$$\Delta W_m = \Delta P_x t + \left(\frac{S_{max}}{S_{ном}} \right)^2 \tau, \quad (4.37)$$

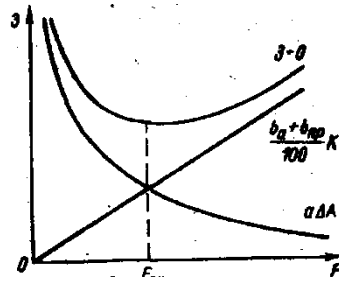
де ΔW_t – сумарні активні втрати електроенергії в трансформаторі, кВт·год; ΔP_x – втрати потужності холостого ходу трансформатора, кВт; t – тривалість ввімкнення під навантаження трансформатора, год; ΔP_k – втрати потужності короткого замикання, кВт; S_{max} – максимальне навантаження трансформатора, кВ · А; $S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора, кВ · А; τ – час втрат електроенергії, год.

3. Вартість передачі електроенергії визначається вартістю втрат енергії в проводах, відрахуваннями від капітальних затрат і вартістю обслуговування. Остання визначається витратами експлуатаційної організації, штат якої залежить від загального кілометражу ліній і кількості підстанцій.

Відрахування від капітальних затрат (відрахування на амортизацію, витрати на поточний ремонт) $(b_a + b_{п.р.})K/100$ із збільшенням перерізу проводів збільшуються, бо збільшується їх загальна вартість (капіталовкладення), а вартість втрат енергії $a\Delta A$ (де a – вартість одиниці електроенергії) зменшується (мал.4.6.).

Якщо скласти ординати $(b_a + b_{п.р.})K/100$ і $a\Delta A$ (відрахування від

капіталовкладень і вартість втраченої електроенергії) , то дістанемо криву З - О - вартість передачі електроенергії без урахування обслуговування.



Крива З - О має мінімум, який відповідає найвигіднішому або, як його називають, найекономічнішому перерізу проводів $F_{ек}$.

Мал. 4.6. Залежність вартості ліній електропередачі від площі перерізу проводів

Для кожної лінії можна побудувати аналогічні криві і визначити економічний переріз проводів.

Таблиця 4.1. Економічна густина струму, А/мм²

Провідники	Тривалість використання максимуму навантаження, год/рік		
	1000 ... 3000	3000 ... 5000	понад 5000
Голі проводи і шини:			
мідні	2,5	2,1	1,8
алюмінієві	1,3	1,1	1,0
Кабелі з паперовою і проводи з гумовою і полівінілхлоридною ізоляцією і жилами:			
мідними	3,0	2,5	2,0

алюмінієвими	1,6	1,4	1,2
Кабелі з гумовою або пластмасовою ізоляцією і жилами:			
мідними	3,5	3,1	2,7
алюмінієвими	1,9	1,7	1,6

Проте на практиці ведуть розрахунки простіше. Правилами влаштування електроустановок передбачені значення економічної густини струму $j_{ек}$, що відповідають економічним перерізам проводів з різних металів при різній тривалості використання максимуму навантаження (табл.4.1.). Звідси:

$$F_{ек} = \frac{I}{j_{ек}} \quad (4.38)$$

Якщо вибирається провід одного перерізу вздовж лінії, але з різними навантаженнями на окремих її ділянках, то спочатку знаходять поправочний коефіцієнт на економічну густину струму початкової ділянки k_y за формулою:

$$k_y = \sqrt{\frac{I_1^2 L}{I_1^2 l_1 + I_2^2 l_2 + \dots + I_n^2 l_n}} \quad (4.39)$$

де $I_1, I_2, \dots, I_n$ – струмові навантаження окремих ділянок лінії, А; $l_1, l_2, \dots, l_n$ – довжина цих ділянок, км; L – повна довжина лінії, км; n – кількість ділянок лінії.

Якщо коефіцієнт потужності для всіх ділянок однаковий, то в формулу (4.39) замість струмів можна підставити значення активних потужностей $P_1, P_2, \dots, P_n$.

Значення економічної густини струму при врахуванні поправочного коефіцієнта, зведене до навантаження першої ділянки:

$$j_{ек1} = j_{ек} k_y \quad (4.40)$$

де $j_{ек}$ - нормативна економічна густина струму з таблиці 4.1.

Економічний переріз провoda магістралі визначається за струмовим навантаженням першої ділянки:

$$F_{ек} = \frac{I_1}{j_{ек1}} \quad (4.41)$$

Контрольні запитання

1. Які бувають графіка навантаження?
2. Якими показниками характеризується економічність електроустановок?
3. Що таке тривалість використання максимуму навантаження?
4. Що називається часом втрат?
5. Як визначається переріз провoda за економічною густиною струму?