

УДК 658.26:621.316.1.016.3

В. В. Камінський, канд. техн. наук;

А. В. Камінський, канд. техн. наук

КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Пропонуються комп'ютерні моделі визначення розрахункових навантажень за відомими експериментальними даними про графіки активної та реактивної потужності споживання. На відміну від відомих методів розрахунку електронавантажень, запропоновані моделі автоматизують процес визначення не прогнозних, а реальних розрахункових навантажень елементів електропостачальних систем за будь-якого значення постійної часу нагрівання цих елементів. Необхідність в таких розрахунках може виникнути після реконструкції електропостачальної системи, зміни навантажень її елементів в зв'язку з розширенням та модернізацією виробництва, підключенням нових споживачів, а також в процесі енергетичного аудиту.

Визначення розрахункових електричних навантажень є першим і основоположним етапом проектування будь-якої електропостачальної системи (ЕПС). Особлива роль розрахункових навантажень в процесі проектування та експлуатації ЕПС пояснюється тим, що ці параметри виступають вихідними даними для більшості технічних, техніко-економічних та оптимізаційних розрахунків електропостачальних систем та визначають умови допустимості їх вибору та експлуатації. Тому використання неточних значень розрахункових навантажень в процесі проектування ЕПС може значно погіршити її техніко-економічні характеристики, а також призвести до неможливості нормальної роботи споживачів електроенергії. Зважаючи на важливе значення розрахункових навантажень, методи їх визначення регламентуються з 1961 року [1], а наукові роботи по удосконаленню та уточненню цих методів залишаються актуальними до цього часу.

Редакція нормативного документу [1] з 1961 року декілька разів зазнавала змін та уточнень, які враховували нові результати досліджень електронавантажень елементів ЕПС. Діючим на цей час аналогом цього документу є керівні технічні матеріали [2].

Одним із основних методів розрахунку електричних навантажень, який довгий час використовувався як нормативний, був метод «упорядкованих діаграм», розроблений Г. М. Каяловим [3]. До цього часу цей метод не втратив свого значення, а нормативні матеріали [2] базуються на його відповідно змінений та уточнений редакції [5].

Документ [2], як і його попередники, регламентує процес прогнозування розрахункових навантажень на стадії проектування ЕПС, коли реальні навантаження елементів електропостачальної системи ще не можуть бути відомими. При цьому навантаження в реально діючій ЕПС можуть відрізнятися від знайдених значень в процесі її проектування з причини похибок метода розрахунку та неточного врахування вихідних даних. Уточнити значення навантажень можна вже в процесі експлуатації ЕПС за допомогою вимірювань цих навантажень. Це дасть можливість визначити реальний запас пропускної здатності елементів ЕПС та перевірити допустимість навантаження цих елементів. Така необхідність, зокрема, виникає після реконструкції ЕПС, зміни навантажень її елементів у зв'язку з розширенням та модернізацією виробництва, підключенням нових споживачів та з інших причин.

Далі пропонуються математичні та комп'ютерні моделі, реалізовані в середовищі математичного САПР MathCad та електронного процесора Excel, які дозволяють визначити розрахункові навантаження елементів ЕПС за відомими графіками цих навантажень.

Як відомо із робіт [3, 4], графіками електричного навантаження називаються функції залежності активної $P(t)$, реактивної $Q(t)$, повної $S(t)$ потужностей та струму $I(t)$ від часу t . Згідно РТМ 36.18.32.4-92 [2], розрахунковій активній P_p та реактивній Q_p потужності відповідає таке незмінне струмове наванта-

ження I_p , яке еквівалентне фактичному змінному в часі навантаженню елемента ЕПС за максимальною температурою нагрівання цього елемента.

Для визначення розрахункового навантаження елемента ЕПС за відомим графіком його навантаження будемо використовувати обґрунтований в теорії електричних навантажень принцип максимуму середнього навантаження [3], на якому базується і нині чинний норматив [2] для визначення очікуваних навантажень елементів ЕПС. Згідно цього принципу максимальне середнє навантаження за максимально навантаженою зміну роботи споживача електроенергії з інтервалом осереднення $T = 3 \cdot T_0$ береться рівним розрахунковому навантаженню, де T_0 — постійна часу нагрівання елемента ЕПС, для якого визначається розрахункове навантаження.

Будемо виходити із відомих графіків активної $P(t)$ та реактивної $Q(t)$ потужностей за період часу експериментальних вимірювань навантаження T_b (як правило T_b дорівнює тривалості максимально завантаженої зміни роботи).

Окремі точки графіків $P(t)$, $Q(t)$ можна виміряти і записати з допомогою сучасних багатофункціональних електронних лічильників електроенергії. Наприклад, з допомогою лічильників АСЕ6000, SL7000 графіки навантажень $vP(t)$, $vQ(t)$ можна записати з програмованим періодом інтеграції лічильника 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60 хвилин.

Струмний графік навантаження елемента ЕПС через відомі його графіки потужності $P(t)$ та $Q(t)$ виражається за допомогою формули

$$I(t) = \frac{\sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2}}{U},$$

де U — напруга елемента ЕПС.

Початок періоду часу T_b позначимо t_{start} , а кінець — t_{end} . Умовно припускаємо $t_{\text{start}} = 0$. В такому випадку $t_{\text{end}} = T_b$, а залежність середнього навантаження за період часу $T = 3 \cdot T_0$ від часу кінця періоду осереднення T буде виражатися функціоналом:

$$I_c(t) = \frac{\int_{t-3T_0}^t I(x) dx}{3T_0}, \quad t \in [t_{\text{start}} + 3 \cdot T_0; t_{\text{end}}]. \quad (1)$$

Згідно принципу максимуму середнього навантаження [3] розрахунковий струм I_p дорівнює глобальному максимуму функціонала (1) на діапазоні часу $[t_{\text{start}} + 3T_0; t_{\text{end}}]$. Тому пошук розрахункового струму можна звести до розв'язку такої оптимізаційної задачі:

$$I_p = I_c \left(\underset{t \in [t_{\text{start}} + 3T_0; t_{\text{end}}]}{\operatorname{argmax}} I_c(t) \right). \quad (2)$$

Дослідження, проведені авторами показали, що задачу (2) можна розв'язати стандартними засобами умовної максимізації функцій, вбудованими в такі математичні САПР як MatLab та MathCad. Однак ця задача має ряд особливостей, які ускладнюють її розв'язання. По перше, виміряні навантаження складають кінцеву сукупність значень $vP(t)$, $vQ(t)$, $t = t_{\text{start}}$, $t_{\text{start}} + \text{step}$, $t_{\text{start}} + 2 \cdot \text{step}$, ..., t_{end} , де step — вибраний період інтеграції електронного лічильника. Отримані значення навантажень є лише окремими точками графіків $P(t)$ та $Q(t)$. Використовуючи ці точки, графіки навантажень можна зобразити у вигляді розривних ступеневих або неперервних ломаних кривих. В той же час вбудовані в сучасні програмні САПР методи максимізації функцій вимагають, щоб ці функції були не тільки неперервними, але й гладкими.

По друге, функціонал (1) може мати більше ніж один екстремум, а тому вбудовані в програмні САПР методи оптимізації не гарантують визначення його глобального екстремуму.

Першу складність можна обійти, апроксимувавши залежність

$$vI(t) = \frac{\sqrt{vP(t)^2 + vQ(t)^2}}{U}$$

стандартними засобами інтерполяції функцій широкодоступних математичних САПР. В середовищі MathCad це можна зробити за допомогою стандартних функцій `interp` та `cspline`, замінивши вихідну залежність $vI(t)$ кубічним інтерполяційним сплайном $I(t)$ з вузлами інтерполявання:

$$t_{start}, t_{start} + step, t_{start} + 2 \cdot step, \dots, t_{end}.$$

В результаті отримаємо гладку на відрізку часу $[t_{start}; t_{end}]$ функцію $I(t)$, яка у всіх вузлах інтерполювання дорівнює значенням струму $vI(t)$, отриманими в процесі вимірювання електронавантажень.

На рис. 1 зображена перша частина комп'ютерної моделі визначення розрахункового навантаження елемента ЕПС, в якій вводяться вихідні дані задачі (показані напівжирним шрифтом) та виконується апроксимація експериментально отриманого струмового графіка навантаження. Масиви експериментально отриманих значень активної vP та реактивної vQ потужності елемента ЕПС читаються з робочого листа електронного процесора Excel, а на робочому листі MathCad показано тільки три перших елемента прочитаних масивів.

```

ORIGIN := 0      Напруга елемента ЕПС, кВ:  U := 10.3
Період інтеграції електронного лічильника, хвилини:  Δtінт := 6
Тривалість вимірювання, години:  Tв := 9
Експериментальні значення електронавантажень, кВт, квар:
vP := 

|   |       |
|---|-------|
|   | 0     |
| 0 | 179.9 |
| 1 | 185.1 |
| 2 | 190   |
| 3 | ...   |

      vQ := 

|   |       |
|---|-------|
|   | 0     |
| 0 | 150.2 |
| 1 | 155   |
| 2 | 159.8 |
| 3 | ...   |



Постійна нагрівання елемента ЕПС, хвилини:  T0 := 50      T0 :=  $\frac{T_0}{60}$ 
Кількість інтервалів осереднення потужності:  n :=  $\frac{T_v \cdot 60}{\Delta t_{інт}}$  = 90
Вектор умовних моментів часу експериментальних вимірювань навантаження:
i := 0, 1..n      vti :=  $\frac{\Delta t_{інт}}{60} \cdot i$ 
Умовні початковий та кінцевий час експериментальних вимірювань навантаження:
tstart := vt0 = 0      tend := vlength(vP) - 1 = 9
Вектор струмового навантаження, А:  vI :=  $\frac{\sqrt{vP^2 + vQ^2}}{\sqrt{3} \cdot U}$ 
Апроксимована залежність струму від часу:  I(t) := interp(cspline(vt, vI), vt, vI, t)
    
```

Рис. 1. Перша частина комп'ютерної моделі визначення розрахункових навантажень. Апроксимація експериментальних даних струмового навантаження

однієї із однострансформаторних підстанцій 10/0,38 кВ Северинівського цегельного заводу Вінницької області. Графік отримано авторами за допомогою електронного лічильника з періодом інтеграції шість хвилин та тривалістю вимірювання дев'ять годин. На цьому ж рисунку гладка крива зображує апроксимовану залежність $I(t)$.

Використовуючи сплайн $I(t)$, можна розв'язати задачу (2), використовуючи функцію Maximize математичного САПР MathCad.

Однак, враховуючи другу особливість задачі (2), для визначення глобального максимуму функціонала (1) попередньо необхідно побудувати його графік, за допомогою якого задати початкове значення функціонала $I_c(t)$ в околі його глобального максимуму. Можна також задати обмеження на аргумент t в блоці розв'язку Given математичного САПР MathCad виду $t_1 \leq t \leq t_2$, де $[t_1, t_2]$ — відрізок часу, на якому має місце лише глобальний максимум функціонала (1).

Графік залежності $I_c(t)$ для кабельної лінії з постійною часу нагрівання $T_0 = 50$ хвилин, по якій передається навантаження згідно графіка, зображеного на рис. 2, показано на рис. 3.

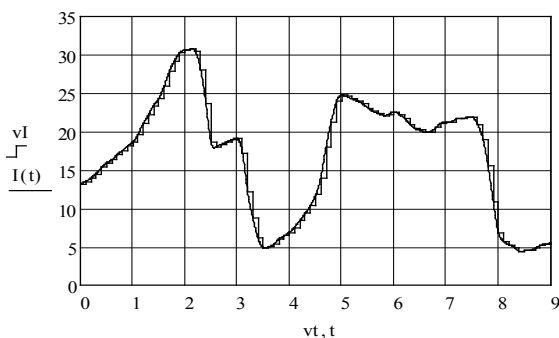


Рис. 2. Ступеневий експериментальний та гладкий апроксимований графіки струмового навантаження підстанції 10/0,38 кВ цегельного заводу

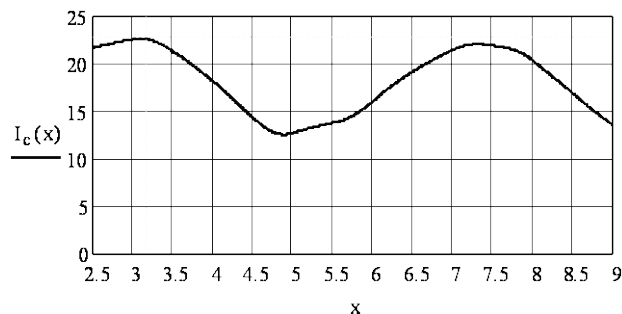


Рис. 3. Залежність середнього струму за час осереднення $T = 3 \cdot T_0$ від часу

Другу частину комп'ютерної моделі визначення розрахункового навантаження з результатами розрахунку наведеної задачі показано на рис. 4.

Із рис. 3 видно, що на відрізку часу від 2,5 до 3,5 годин має місце тільки один екстремум функ-

ціонала $I_c(t)$, який є глобальним максимумом. Тому в якості початкового значення часу в наведеній на рис. 4 комп'ютерній моделі можна задати будь-яку точку цього відрізка.

Як бачимо з рис. 4, розрахункове навантаження кабельної лінії 10 кВ з постійною часу нагрівання $T_0 = 50$ хвилин, по якій протікає струм згідно графіка рис. 2, складає 22,7 А або 404,8 кВА.

$\int_{t-3T_0}^t I(x) dx$

Залежність середнього струму за час осереднення $3 \cdot T_0$ від часу: $I_c(t) := \frac{\int_{t-3T_0}^t I(x) dx}{3T_0}$

Початкове значення часу глобального максимуму навантаження, год: $t := 3$

Given

$t_{start} + 3T_0 \leq t \leq t_{end}$

$t_p := \text{Maximize}(I_c, t) = 3.12$ Розрахунковий струм, А: $I_p := I_c(t_p) = 22.7$

Повна розрахункова потужність, кВА: $S_p := \sqrt{3} \cdot U \cdot I_p = 404.8$

Рис. 4. Друга частина комп'ютерної моделі визначення розрахункових навантажень з результатами розрахунку

Запропонована комп'ютерна модель розв'язує поставлену задачу, але має недолік, пов'язаний із необхідністю побудови графіка функціонала (1) та визначення з його допомогою початкового значення керованої змінної задачі (2).

Проведені авторами дослідження показали, що з урахуванням особливостей поставленої задачі, ефективності сучасних персональних ЕОМ та їх програмного забезпечення, цього недоліку можна позбутися за рахунок відмови від використання стандартних методів оптимізації в процесі розв'язання задачі (2). Враховуючи, що період експериментальних вимірювань навантаження повинен містити в собі максимально завантажену зміну роботи споживача електроенергії, а збільшувати тривалість вимірювання за межі часу максимально завантаженої зміни немає сенсу, то ця тривалість, як правило, буде складати не більше 8—10 годин. Протягом такого обмеженого періоду часу можна підрахувати значення функціонала $I_c(t)$ з деяким наперед заданим малим кроком, а із отриманих результатів вибрати найбільший. Очевидно знайдене таким чином значення буде дорівнювати глобальному максимуму функціонала (1) з точністю, яка залежить від заданого кроку пошуку розрахункового навантаження. Теоретично, чим меншим буде цей крок, тим точніше буде знайдене значення розрахункового навантаження. Однак, виконані авторами розрахункові експерименти показали, що вибір кроку, меншого за 1—5 хвилин, практично не змінює величину визначеного розрахункового навантаження, а тривалість розрахунку на процесорі з реальною тактовою частотою 2200 МГц за вибраного кроку пошуку розрахункового навантаження 1 хв. з тривалістю вимірювання 9 годин складає менше чотирьох секунд, що навіть менше ніж у випадку використання стандартної функції Maximize робочого листа MathCad.

Для реалізації запропонованого алгоритму пошуку розрахункового навантаження другу частину наведеної вище комп'ютерної моделі (рис. 4) необхідно замінити на наведену на рис. 5.

З рис. 5 видно, що результат визначення розрахункового навантаження не змінився, а процес його досягнення спростився оскільки, після введення даних, розрахунок в цьому випадку виконується автоматично.

З робіт з теорії електричних навантажень відомо (дивись наприклад [3]), що для графіків з високою нерівномірністю навантаження за розрахункове навантаження необхідно брати максимум ефективного, а не середнього навантаження. За допомогою запропонованих комп'ютерних моделей це можна легко зробити. Для цього необхідно лише замінити

Крок пошуку розрахункового навантаження, хвилини: $step := 1$ ~~$step := \frac{step}{60}$~~

$i := 0, 1 \dots \frac{(t_{end} - t_{start}) - 3 \cdot T_0}{step}$

Вектор середніх струмів за час осереднення $3T_0$: $vI_{c_i} := \frac{\int_{t_{start}+i \cdot step}^{t_{start}+i \cdot step+3 \cdot T_0} I(t) dt}{3T_0}$

Розрахунковий струм, А: $I_p := \max(vI_c) = 22.7$

Повна розрахункова потужність, кВА: $S_p := \sqrt{3} \cdot U \cdot I_p = 404.8$

Рис. 5. Друга частина комп'ютерної моделі визначення розрахункових навантажень без використання стандартної функції Maximize

