

УДК 621.311.1

Н.М. ПОГРІБНЯК (канд.техн.наук, доц.)
Донецький національний технічний університет
N.N.Pogrebnyak@gmail.com

ІНТЕГРОВАНІЙ ІМІТАЦІЙНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Запропонований імітаційний метод визначення розрахункових електричних навантажень за нагрівом. Метод дозволяє обчислювати розрахункові навантаження всіх ділянок розгалуженої електричної мережі цеху під час одного розрахунку за повними навантаженнями. Метод може бути застосований при проектуванні електричних мереж цехів промислових підприємств напругою до 1 кВ..

Постановка задачі. Ефективність роботи промислового підприємства у значній мірі залежить від функціонування його системи електропостачання. Проектування електропостачання промислового підприємства ведеться на основі результатів розрахунку електричних навантажень. Правильне визначення електричних навантажень забезпечує електромагнітну сумісність електроприймачів (ЕП), запобігає неприпустимим перегрівам елементів електричної мережі та зайвим капіталовкладенням.

З 1992 р. розрахунок навантажень промислових електричних мереж напругою 0,38 кВ виконується за модифікованим статистичним методом [1], що покладений у основу діючих Вказівок [2]. Застосування модифікованого статистичного метода замість метода впорядкованих діаграм дозволило запобігти значному необґрунтованому перевищенню розрахункових навантажень. Однак модифікованому статистичному методу притаманні недоліки статистичного метода. У якості розрахункового навантаження у ньому приймається розрахунковий максимум кумулятивного процесу – осередненого на 30-хвилинному інтервалі групового графіка навантаження, що не відповідає процесу нагріву провідника. Некоректність однієї з основних формул метода [1] призводить до того, що при ефективному числі ЕП рівному одиниці, коефіцієнт розрахункового навантаження наближається до безкінечності. Внаслідок чого при складанні Вказівок [2] значення коефіцієнта розрахункового навантаження були скоректовані, про що свідчать не гладкі криві його залежності від ефективного числа ЕП. Цим обумовлена необхідність вдосконалення діючих Вказівок шляхом розробки нового метода розрахунку електричних навантажень.

Метою роботи є підвищення ефективності систем електропостачання промислових підприємств шляхом підвищення точності визначення розрахункових навантажень електричних мереж напругою 0,38 кВ. В розробленому методі розрахунку електричних навантажень підвищення точності буде забезпечено моделюванням групових графіків повного навантаження ділянок електричної мережі, а зменшення часу, необхідного для розрахунку електричних навантажень всіх ділянок розгалуженої електричної мережі, буде досягнуто одночасним моделюванням групових навантажень всіх ділянок.

Теплова модель провідника. У теорії електричних навантажень для визначення температури ϑ перегріву провідника відносно оточуючого середовища застосовується теплова модель провідника у вигляді рівняння

$$T \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = k_{\vartheta} I^2(t), \quad (1)$$

де T - стала часу нагріву провідника, с; $I(t)$ - струм навантаження, А; $k_{\vartheta} = 3R/A$ ($^{\circ}\text{C}/\text{A}^2$), R - активний опір жили провідника, Ом, A - коефіцієнт тепловіддачі провідника, Вт/ $^{\circ}\text{C}$.

Для більшої зручності замість температури перегріву провідника будемо застосовувати нагрівальну дозу $Z_T(t) = \vartheta(t)/k_{\vartheta}$ - пропорційну температурі нагріву провідника величину, що має розмірність квадрата навантаження. З врахуванням цього рівняння (1) має вигляд

$$T \frac{dZ_T(t)}{dt} + Z_T(t) = I^2(t). \quad (2)$$

Ідея інтегрованого імітаційного метода. Задача визначення розрахункового навантаження не має аналітичного рішення тому що при відомому законі розподілу електричного навантаження не можна визначити закон розподілу температури перегріву провідника (нагрівальної дози) і за ним розрахункове електричне навантаження. Для розв'язання таких задач застосовується метод імітаційного моделювання. У [3-5] запропонований імітаційний метод визначення розрахункових навантажень. Згідно з ним розрахункове активне навантаження визначається за результатами моделювання ансамблю реалізацій групового графіка активного навантаження, за яким розраховується температура перегріву провідника. Визначення максимального розрахункового значення температури перегріву провідника (або нагрівальної дози) виконується за опитною функцією її розподілу, а розрахункове активне навантаження визначається за знайденим розрахунковим значенням температури перегріву провідника. Розрахункове реактивне навантаження визначається так само, як і у інженерному модифікованому статистичному методі [1, 2], що є його недоліком. В усіх відомих методах визначення розрахункових навантажень розрахунок активного та реактивного навантаження ведеться окремо,

© Погрібняк Н.М., 2011

що не відповідає фізиці процесу нагріву провідника. Для підвищення точності розрахунку електричних навантажень у розробленому методі виконується імітація ансамблів реалізацій групових активних та реактивних навантажень, температура перегріву провідника визначається за повним навантаженням.

Послідовне застосування імітаційного методу для кожної ділянки розгалуженої електричної мережі призведе до багатократних моделювань одних і тих самих індивідуальних навантажень, що передаються по різних ділянках. Це недоцільно, оскільки застосування імітаційного методу потребує значних витрат часу. З метою зменшення часу розрахунку шляхом уникнення повторних моделювань індивідуальних навантажень пропонується інтегрований імітаційний метод, згідно з яким виконується одночасне формування групових навантажень всіх ділянок електричної мережі будь-якої конфігурації. Таким чином, при імітації одного набору реалізацій групових графіків навантажень різних ділянок мережі моделювання індивідуальних навантажень кожного ЕП здійснюватиметься один раз. При цьому отриманий графік індивідуального навантаження буде додаватися до групових графіків навантаження всіх силових пунктів (СП) або інших елементів мережі, у формуванні групових графіків навантажень яких бере участь цей ЕП. Реалізація імітаційного методу через великий обсяг розрахунків можлива тільки на ЕОМ, для цього була розроблена відповідна програма.

Модель електричного навантаження. Моделювання групових графіків активного і реактивного електричного навантаження виконується складанням відповідних індивідуальних графіків. Розглянемо їх моделі.

До окремої групи виділимо механізми з асинхронним приводом, як найбільш розповсюджені. У імітаційному методі модель індивідуального активного навантаження ЕП з номінальною активною потужністю P_n і коефіцієнтом k_3 завантаження прийнята у вигляді імпульсного процесу з величиною імпульсу $P_n k_3$ і нульовою паузою. Уточнимо цю модель для ЕП з асинхронним приводом.

Розглянемо графік активного навантаження. Величина імпульсу для двигуна з номінальною потужністю P_n і ККД η_n , що працює з коефіцієнтом завантаження k_3 дорівнює

$$P_i = \frac{P_n \cdot k_3}{\eta_n}, \quad (3)$$

Активне навантаження під час паузи визначається активною потужністю холостого ходу двигуна. Її значення визначимо орієнтовно, оскільки на стадії проектування електричної мережі, коли виконується розрахунок електричних навантажень, є інформація тільки про номінальну потужність та коефіцієнт k_b .

Втрати активної потужності у статорі $\Delta P_{ел1}$ та роторі $\Delta P_{ел2}$ асинхронного двигуна, додаткові втрати ΔP_d , що залежать від конструкції та технології його виготовлення, змінюються пропорційно квадрату струму навантаження, складають змінні втрати $\Delta P_{зм} = \Delta P_{ел1} + \Delta P_{ел2} + \Delta P_d$.

Втрати в магнітопроводі ΔP_M і механічні втрати $\Delta P_{мех}$ не залежать від навантаження (постійні втрати) $\Delta P_{пост} = \Delta P_M + \Delta P_{мех}$. Згідно з [6] відносне значення втрат становить $\Delta P_{мех} = 5 \div 10\%$, $\Delta P_M = 15 \div 20\%$, тому з запасом приймаємо $\Delta P_{пост} = 35\%$.

Змінні втрати складають близько 65% від номінальних. З них, згідно з [6], втрати у роторі складають $\Delta P_{ел2} = 20\%$. Оскільки у режимі холостого ходу струм ротора малий, втрати у роторі не враховуємо. Таким чином змінні втрати холостого ходу дорівнюють $\Delta P_{зм \text{ холост}} = \Delta P_d + \Delta P_{ел1} = 45\%$ від номінальних втрат.

Виходячи з розглянутого розподілення втрат, отримуємо формулу для визначення активної потужності, що споживається двигуном у режимі холостого ходу

$$\Delta P_0 = (0,35 + 0,45 \cdot k_{30}^2) \Delta P_n,$$

де $k_{30} = \frac{I_0}{I_n}$ - відносне значення струму холостого ходу - відношення струму холостого ходу I_0 до

номінального струму I_n ; $\Delta P_n = P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right)$ - номінальні втрати активної потужності у асинхронному двигуні.

Відносне значення струму холостого ходу

$$k_{30} = \frac{I_0}{I_n} = \frac{Q_0}{S_n \cdot \sin \phi_0},$$

де Q_0 - реактивна потужність холостого ходу асинхронного двигуна; ϕ_0 - кут здвигу струму статора відносно напруги.

У режимі холостого ходу $\sin \phi_0 \approx 1$, реактивна потужність Q_0 складає 50 ÷ 80% від номінальної Q_n . Приймавши $Q_0 = 0,65 \cdot Q_n$, маємо $k_{30} = 0,65 \cdot \sin \phi_n$. Із врахуванням цього, формула для визначення активної потужності холостого ходу асинхронного двигуна (на моделі графіка навантаження – величина навантаження під час паузи P_1) приймає вигляд:

$$P_n = \Delta P_0 = P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \cdot \left(0,35 + 0,45 \cdot (0,65 \sin \phi_n)^2 \right). \quad (4)$$

Реактивне навантаження, що споживається асинхронним двигуном, в залежності від значення коефіцієнта завантаження визначається виразом

$$Q = Q_0 + Q_{PH} \cdot k_3^2,$$

де Q_{PH} - втрати реактивної потужності на розсіяння при номінальному навантаженні, $Q_{PH} = Q_H - Q_0$. Прийняв $Q_0 = 0,65 \cdot Q_H$, $Q_{PH} = 0,35 \cdot Q_H$ величина імпульсу графіка реактивної потужності ЕП з асинхронним приводом складає

$$q_i = (0,65 + 0,35 \cdot k_3^2) \cdot Q_H, \quad (5)$$

а реактивне навантаження під час паузи має значення

$$q_n = 0,65 \cdot Q_H. \quad (6)$$

Якщо передбачається застосування обмеження холостого ходу асинхронних двигунів, величини активного і реактивного навантажень під час паузи мають нульове значення.

Для інших електроприймачів зберігаємо прийнятий у імітаційному методі [5] підхід. Згідно з ним, величини імпульсів і пауз графіків активного і реактивного навантажень розраховуються за виразами

$$p_i = P_H k_3, \quad p_n = 0, \quad q_i = P_H \cdot k_3 \cdot tg \phi_H, \quad q_n = 0, \quad (7)$$

де $tg \phi_H$ - номінальне значення коефіцієнта потужності ЕП.

Застосування модифікованого метода елементних процесів (ММЕП) для моделювання графіка електричного навантаження групи ЕП. Індивідуальні графіки електричних навантажень характеризуються експоненційно-косинусоїдною кореляційною функцією (КФ) (наприклад, експериментальні нормовані КФ ЕП наведені в [7])

$$k(\tau) = Dp \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \omega_0 \tau, \quad (8)$$

де Dp - дисперсія індивідуального графіка навантаження; α - параметр КФ, зворотний часу кореляції, c^{-1} ; ω_0 - частота періодичної складової, c^{-1} .

Параметри КФ індивідуальних навантажень можуть бути визначені як експериментально [7], так і з технологічних розрахунків. В останньому випадку індивідуальне навантаження представляють у вигляді імпульсного процесу, дисперсію й параметри КФ якого можна визначити за формулами (I.78), (IV.34) і (IV.39) з [8]:

$$Dp = p_a^2 k_B (k_3 - k_B), \quad \alpha = \frac{k_3^2}{k_B (k_3 - k_B) t}, \quad \omega_{0н} = 2\pi/t. \quad (9)$$

де k_a - коефіцієнт використання обладнання; t_0 - тривалість циклу роботи обладнання.

У теорії електричних навантажень прийнято та підтверджено проведеними дослідженнями в мережах електропостачання промислових підприємств [8, 9] що КФ групового графіка електричного навантаження має вигляд:

$$K(\tau) = DP e^{-\alpha|\tau|}, \quad (10)$$

де DP - дисперсія групового графіка навантаження.

Модель групового навантаження з експоненційною КФ (10) забезпечує деякий запас при визначенні розрахункових навантажень.

Для моделювання групового графіка електричного навантаження з експоненційною КФ може бути застосований модифікований метод елементних процесів [5], що базується на методі елементних процесів [8]. Згідно з методом елементних процесів процес $P(t)$ із заданою КФ $K(\tau)$ отримуємо додаванням N_a елементних процесів $p(t)$ з однаковими КФ: $k(\tau) = K(\tau) / N_a$. Метод елементних процесів відображає фізичну картину формування групового графіка електричних навантажень, оскільки подібно тому, як індивідуальні навантаження формують груповий графік, у цьому методі при моделюванні реалізації додаються елементні процеси. Для імітації процесу з експоненційною КФ у якості «елементного» використовується імпульсний процес, тривалості t імпульсів і пауз якого розподілені на інтервалі $t_0 < t < \infty$ за експоненціальним законом із щільністю розподілу

$$f(t) = a e^{-a(t-t_0)}. \quad (11)$$

де a - величина, зворотна середній тривалості імпульсу $a = 1/k_{ВВІМКН} t$ або паузи $a = 1/(1 - k_{ВВІМКН}) \cdot t$; $k_{ВВІМКН}$ - коефіцієнт ввімкнення.

Середня тривалість циклу визначається за виразом

$$t_{ц} = \frac{1}{\alpha k_{ВВІМКН} (1 - k_{ВВІМКН})}. \quad (12)$$

У методі елементних процесів елементні процеси мають однакові величини імпульсів і коефіцієнтів ввімкнення, тоді як реальні характеристики для різних ЕП відрізняються. Це призводить до неточного відтворення функції розподілу групового навантаження. ММЕП усуває вказаний недолік.

Згідно з ММЕП при імітації групового графіка кількість елементних процесів приймається рівною кількості n ЕП: кожний елементний процес буде імітувати індивідуальний графік навантаження одного ЕП з фактичним значенням величини імпульсу p_i (згідно з моделлю індивідуального навантаження) і коефіцієнта ввімкнення.

Дисперсії Dp індивідуальних графіків навантажень при різних значеннях потужностей, коефіцієнтів завантаження і ввімкнення електроприймачів відрізняються. Кореляційна функція групового навантаження має вигляд

$$K(\tau) = \sum_{i=1}^n Dp_i e^{-\alpha|\tau|} = e^{-\alpha|\tau|} \sum_{i=1}^n Dp_i.$$

Імовірнісні розподіли тривалостей імпульсів і пауз кожного ЕП приймаються за (11). Середня тривалість циклу індивідуальних навантажень у ММЕП, як й у методі елементних процесів, визначається за виразом (12). Тому тривалості циклів окремих ЕП відрізняються від фактичних.

Для застосування метода елементних процесів необхідно визначити еквівалентний параметр кореляційної функції групового графіка електричного навантаження. В [5] виконане співставлення різних методів визначення еквівалентного параметра кореляційної функції. За його результатами виявилось, що метод найменших квадратів дає найменшу похибку, тому скористаємося ним.

Згідно з методом найменших квадратів слід знайти таке значення α_e , при якому функція

$$V(\alpha_e) = \int_0^{\infty} \left(\sum_{i=1}^n Dp_i e^{-\alpha_i|\tau|} \cos(\omega_{0i}\tau) - DP e^{-\alpha_e|\tau|} \right)^2 d\tau,$$

приймає мінімальне значення, тобто $\frac{dV(\alpha_e)}{d\alpha_e} = 0$,

В результаті диференціювання після перетворень отримаємо трансцендентне рівняння для визначення α_e по методу найменших квадратів:

$$\sum_{i=1}^n Dp_i \frac{(\alpha_i + \alpha_e)^2 - \omega_{0i}^2}{((\alpha_i + \alpha_e)^2 + \omega_{0i}^2)^2} - \frac{DP}{4\alpha_e^2} = 0. \quad (13)$$

Таким чином, щоб застосувати метод елементних процесів для моделювання групового графіка електричних навантажень з експоненційною кореляційною функцією (10) треба:

1. Визначити дисперсії індивідуальних графіків активних навантажень, параметри їх КФ за (9).
2. Визначити еквівалентний параметр КФ групового графіка активного навантаження з рівняння (13).
3. За формулою (12) розрахувати тривалість циклу кожного елементного процесу, що імітує індивідуальний графік електричного навантаження, за умови збереження фактичного значення коефіцієнта ввімкнення відповідного електроприймача.

Слід зазначити, що елементні процеси, які застосовуються для формування групового графіка електричного навантаження, не є відтворенням індивідуальних графіків електричних навантажень. Це допоміжні випадкові процеси, але далі умовно будемо їх називати індивідуальними графіками електричних навантажень.

Алгоритм інтегрованого імітаційного метода. Вихідні дані для виконання розрахунку задаються у матриці зі значеннями номінальної потужності, коефіцієнта використання, $tg\phi$, кодом елемента мережі (СП, шинопровода), до якого підключений електроприймач. Конфігурація електричної мережі задається матрицею з кодами елементів мережі та кодами елементів мережі, до яких вони підключені. Також для всіх елементів мережі задаються значення сталої часу нагріву провідника, що живить елемент мережі. На першому етапі розрахунку, коли ще не обрані перетини провідників, значення сталої часу нагріву приймається за [2] 150 хв. для шинопроводів і трансформаторів і 10 хв. для провідів і кабелів.

Алгоритм інтегрованого імітаційного метода включає такі етапи:

1. Розрахунок тривалості реалізації T_p , виходячи з тривалості перехідного процесу нагріву провідника з найбільшою сталою часу нагріву T_{max} , яка не перевищує граничне значення T_r (в програмі прийнято 20 хвилин) $T_p = 5T_{max}$. Індивідуальні і групові графіки навантажень будуть надалі моделюватися для визначеного значення тривалості реалізації T_p , а для елементів мережі, стала часу нагріву яких перевищує T_r , передбачене формування групового графіка навантаження шляхом повтору необхідної кількості (в залежності від значення його сталої нагріву) вже отриманих фрагментів тривалістю T_r .

2. Аналіз схеми електричної мережі: для кожного елемента мережі (наприклад, СП), формується перелік елементів мережі, що підключені до нього.

3. Визначення еквівалентного параметра кореляційної функції групового графіка активного електричного навантаження з рівняння (13).

4. Розрахунок середньої тривалості циклу за виразом (12) кожного елементного процесу, що відповідає індивідуальному графіку електричного навантаження.

5. Моделювання ансамблів реалізацій групових графіків активного, реактивного і повного навантажень кожної ділянки електричної мережі цеха:

5.1 Моделювання реалізацій активних і реактивних індивідуальних навантажень електроприймачів цеху (елементних процесів). Моделювання активного і реактивного індивідуальних навантажень виконується спільно, з однаковими значеннями часу початку імпульсу або паузи.

5.2 Розрахунок ансамблів реалізацій групових графіків активних і реактивних навантажень (складанням відповідних індивідуальних графіків) кожної ділянки електричної мережі. На цьому етапі виконується розрахунок середніх значень активного P_n і реактивного Q_n навантажень ділянок мережі.

5.3 Розрахунок групових графіків повних S навантажень ділянок мережі.

6. Розрахунок ансамблів реалізацій нагрівальних доз $Z_T(t)$ за рівнянням (2).

7. Розрахунок статистичних функцій розподілу нагрівальної дози за перетином отриманих ансамблів $Z_T(t)$ кожної ділянки електричної мережі, що взяті після затухання перехідних процесів нагріву провідників.

8. Визначення розрахункового максимального значення нагрівальної дози $Z_{T\delta}$ с заданою граничною ймовірністю E_x згідно з принципом практичної впевненості [8] за статистичною функцією розподілу нагрівальної дози $F(Z_T): F(Z_{T\delta}) = 1 - E_x$.

9. Визначення розрахункового повного навантаження $S_p = \sqrt{Z_{Tp}}$.

10. Визначення середньозваженого значення $tg\phi_c = Q_c/P_c$ та розрахункового активного і реактивного навантажень кожної ділянки: $P_p = S_p \cdot \cos\phi_c$, $Q_p = \sqrt{S_p^2 - P_p^2}$.

Висновки. Запропонований інтегрований імітаційний метод забезпечує значне зменшення обсягів розрахунків та часу їх виконання (за результатами тестових розрахунків в 9-10 разів) у порівнянні з застосуванням імітаційного метода послідовно до кожної ділянки електричної мережі за рахунок одночасного формування групових графіків навантажень всіх ділянок електричної мережі цеху, що усуває багатократне моделювання індивідуальних графіків навантажень окремих ЕП.

Інтегрований імітаційний метод визначення розрахункових навантажень промислових електричних мереж може бути використаний для виконання точних розрахунків, моделювання графіків активних і реактивних навантажень ділянок електричних мереж, що живлять групу споживачів електричної енергії, оцінки точності існуючих інженерних методів розрахунку навантажень. Крім цього, за допомогою інтегрованого імітаційного метода можна накопити статистичний матеріал для розробки більш точного ніж [2] інженерного метода.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жохов Б.Д. Анализ причин завышения расчетных нагрузок и возможной их коррекции / Б.Д. Жохов // Промышленная энергетика. – 1989. – №7. – С.17-21.
2. Руководящий технический материал. Указания по расчету электрических нагрузок: РТМ 36.18.32.4-92: Утв. ВНИПИ Тяжпромэлектропроект: Введен с 01.01.93 / Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. – М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. – 1992. – № 6-7. – С. 4-27.
3. Погребняк Н.Н. Решение задач электроснабжения путем имитации ансамбля реализаций случайных процессов / Н.Н. Погребняк // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика. - 1998. – Вып. 2.- С. 67-73.
4. Погребняк Н.Н. Анализ режимов сетей электроснабжения имитационными методами / Н.Н. Погребняк // Энергетика и электрификация. - 1999. - №2. - С. 22-24.
5. Погребняк Н.Н. Методы квадратичного инерционного сглаживания в расчетах нагрузок промышленных электрических сетей: дис... канд. техн. наук: 05.14.02. /Н.Н. Погребняк. - Донецк, 1999. - 209 с.
6. Электрические машины: Асинхронные машины / Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е.; под ред. И. П. Копылова. — М.: Высш. шк., 1988.—328 с.
7. Жежеленко И.В. Развитие методов расчета электрических нагрузок / И.В. Жежеленко, В.П. Степанов // Электричество. - 1993. - №2. - С. 1-9.
8. Шидловский А.К. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения / А.К. Шидловский, Э.Г. Куренный. - К.: Наукова думка, 1984. - 271 с.
9. Шидловский А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 224 с.

Надійшла до редколегії 24.12.2010

Рецензент: Е.Г.Курінний

Н.Н. ПОГРЕБНЯК

Донецкий национальный технический университет

N. POGREBNIYAK

Donetsk National Technical University

Интегральный имитационный метод расчета электрических нагрузок. Предложен имитационный метод определения расчетных электрических нагрузок по нагреву. Метод позволяет вычислять расчетные нагрузки всех участков разветвленной электрической сети цеха во время единого расчета по полной нагрузке. Метод может быть применен при проектировании электрических сетей цехов промышленных предприятий напряжением до 1 кВ.

Integrated Simulation Method of Electrical Load Calculation. Simulation method of the rated temperature-rise electrical load calculation is proposed. Method performs the calculation of rated load of all elements of the ramified electric networks of the department during the integrated calculation on total electrical load. The method can be applied in the design of the electric networks with voltage down to the 1 kV at the departments of an industrial plant.