

Алгоритм визначення оптимальних рівнів напруги цехового трансформатора

С.М. Балюта, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

В.Д. Йовбак, кандидат технічних наук, директор Свалявського технічного коледжу НУХТ

Л.О. Копилова, аспірантка кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

Одним з ефективних способів забезпечення якості електричної енергії і зменшення споживання електричної енергії є підтримання раціональних рівнів напруги цехової мережі за допомогою трансформатора.

В статті представлений алгоритм розрахунку раціональних рівнів напруги розподільної електричної мережі цеху промислового підприємства, що використовується при автоматичному регулюванні напруги трансформатора з ПБЗ за допомогою електронного комутатора. Представлені математичні моделі споживачів електричної енергії та елементів електричної мережі цеху. Запропоновано метод експериментального визначення статичних характеристик навантаження на основі активного експерименту з використанням методів регресійного аналізу. Раціональні рівні напруги визначаються з використанням статичних характеристик навантаження за напругою. Проведена оцінка впливу рівнів напруги на споживання активної потужності.

Ключові слова: раціональні рівні напруги, цехова електрична мережа, статичні характеристики навантаження за напругою, система електропостачання цеху, оптимізація електроспоживання, регулювання напруги трансформатора

Одним из эффективных способов обеспечения качества электрической энергии и уменьшения потребления электрической энергии является поддержание рациональных уровней напряжения цеховой сети с помощью трансформатора.

В статье представлен алгоритм расчета рациональных уровней напряжения распределительной электрической сети цеха промышленного предприятия, которые используются при автоматическом регулировании напряжения трансформатора с ПБВ с помощью электронного коммутатора. Представлены математические модели потребителей электрической энергии и элементов электрической сети цеха. Предложен метод экспериментального определения статических характеристик нагрузки на основе активного эксперимента с использованием методов регрессионного анализа. Рациональные уровни напряжения определяются с использованием статических характеристик нагрузки по напряжению. Проведена оценка влияния уровней напряжения на потребление активной мощности.

Ключевые слова: рациональные уровни напряжения, цеховая электрическая сеть, статические характеристики нагрузки по напряжению, система электроснабжения цеха, оптимизация электропотребления, регулирование напряжения трансформатора.

One effective way to ensure the quality of electricity and reduce the consumption of electrical energy is to maintain rational levels guild supply voltage with a transformer.

The article presents an algorithm for calculating the rational level voltage electricity distribution network of industrial enterprise management, which are used for automatic voltage control with the WSP by an electronic switch. Mathematical models of electric power consumers and workshop electric network elements. The method of experimental determination of the static load characteristics on the basis of active experiment using regression analysis techniques. Rational voltage levels are determined using the load voltage static characteristics. It assessed the influence of voltage levels on the active power consumption.

Keywords: rational level voltage guild electrical network, static load voltage characteristics, power plant system, optimization of power consumption, voltage regulation transformer.

Однією з актуальних проблема харчової і цукрової промисловостей є зниження споживання електричної енергії, оскільки це дозволяє зменшити енергоємність продукції, що випускається підприємствами галузі. Ефективним способом забезпечення раціональних рівнів споживання електричної енергії є регулювання напруги в цехових електричних мережах промислових системою автоматичного регулювання напруги (САРН). Розробка алгоритмів керування САРН проводиться на основі математичної моделі об'єкта керування (системи електропостачання цеху). Моделювання режимів системи електропостачання цеху (СЕЦ) пов'язано з певними труднощами, зумовленими тим, що в кожному вузлі є велика кількість електроприймачів, що розрізняються за потужністю, параметрами, завантаженням і умовами роботи. Істотно різняться і склад електронавантаження, а точна інформація по складу і параметрів електроприймачів цеху часто відсутня.

Питанням моделювання систем електропостачання цеху при керуванні електроспоживанням присвячені роботи [1-5]. Зокрема в роботах [1, 2] розглядаються питання керування втратами електричної енергії в центрі живлення на основі автоматизованої інтегрованої системи обліку енергоресурсів з використанням розрахованих рівнів напруги у вузлах цехової мережі без урахування статичних характеристик навантаження і оптимізація режимів за допомогою динамічного програмування. В роботах [3, 4] наведена методика розрахунку рівнів напруги вузлів цехової мережі, що забезпечують раціональні рівні споживання електричної енергії, з урахуванням ступеню компенсації реактивної потужності, місця встановлення конденсаторних батарей і статичних характеристик навантаження U роботі [5] представлена математична модель системи електропостачання цеху, яка використовується в інформаційній системі прийняття рішень в управлінні електроспоживання.

Експериментальному визначенню статичних характеристик навантаження присвячені роботи вітчизняних і зарубіжних вчених [6-14]. Однак при вирішенні цього завдання на практиці крім організаційних і технічних труднощів проведення експерименту доводиться стикатися і з методичними питаннями оцінки точності одержуваних статичних характеристик, завдання планування експерименту з урахуванням необхідної точності, а також розробка методики обробки експериментальних даних.

Аналіз вищезазначених робіт показав, що при побудові САРН цехового трансформатора необхідно визначати рівні напруги, які забезпечують раціональні рівні електроспоживання. Математичні моделі системи електропостачання цеху, що використовуються при розробці алгоритмів визначення раціональних рівнів напруги, не враховують вплив статичних характеристик навантаження за напругою споживачів електричної енергії, поточні значення напруги та електроспоживання, а також реальний ступінь компенсації реактивної потужності.

Завдання полягає у розробці методики розрахунку рівнів напруги, що забезпечують раціональне електроспоживання в системі електропостачання цеху і дозволять розраховувати уставки регулятора напруги автоматизованої системи регулювання напруги системи електропостачання цеху.

Система електропостачання цеху, як об'єкт керування, має такі особливості: велика швидкість електричних процесів; взаємний вплив режимних параметрів (напруги, активна та реактивна потужності); розподілення електроприймачів по території цеху; зміна складу та навантаження електроприймачів; зміна напруги живлення підприємства у період максимуму та мінімуму навантаження енергосистеми; ієрархічний принцип побудови системи електропостачання.

При побудові математичної моделі необхідно враховувати, що визначення раціонального рівня напруги в цеховій мережі повинно базуватися на забезпеченні максимального позитивного ефекту при зниженні напруги на виводах деякої кількості споживачів електричної енергії при утриманні значень напруги в межах, які встановлені ДСТУ.

Математична модель об'єкта керування

Об'єктом керування є споживачі електричної енергії та елементи цехової електричної мережі.

Об'єкт керування складається із цехового трансформатора, кабеля високої напруги, який живить трансформатор, цехової електричної мережі та приймачів цієї мережі (рис.1). Батарея конденсаторів (БК) може бути підключена або до шин низької напруги трансформатора, або до якої-небудь ділянки цехової мережі, або безпосередньо у споживачів ЕП.

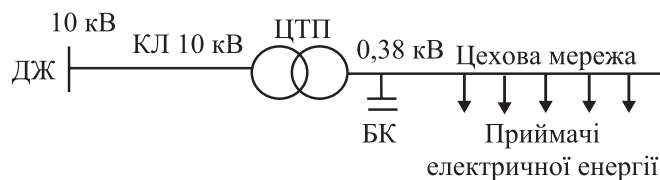


Рис.1. Схема об'єкта керування

Оскільки склад і ступінь завантаження електроприймачів цеху змінюються в залежності від особливостей технологічного процесу, тому, при побудові математичної моделі враховуються статичні

характеристик навантаження за напругою (СХН). СХН визначають за результатами активного в реальному часі на основі значень активної і реактивної потужностей і напруги, що вимірюються на шини 0,4 кВ цехової ТП (ЦТП).

Визначення навантаження, що споживається цеховим трансформатором від джерела живлення

Комплексне навантаження системи електропостачання цеху складається з різномірних приймачів електроенергії таких як технологічні установки, асинхронні двигуни, електричне освітлення, які описуються статичними характеристиками.

Потужність, що споживається від джерела живлення, визначається наступним чином

$$P_{ДЖ}(U_{ДЖ*}) = \sum_{i=1}^n P_{ПНi}(U_{Пi*}) + \Delta P_{Цj}(U_{Цj*}) + \Delta P_{Тj}(U_{Тj*}) + \Delta P_{Кj}(U_{ДЖ*}) + \Delta P_{СТj}(U_{ДЖ*}) \quad (1)$$

$$Q_{ДЖ}(U_{ДЖ*}) = \sum_{i=1}^n q_{ПНi}(U_{Пi*}) + \Delta Q_{Цj}(U_{Цj*}) + \Delta Q_{Тj}(U_{Тj*}) + \Delta Q_{Кj}(U_{ДЖ*}) + \Delta Q_{СТj}(U_{ДЖ*}) - Q_{БКj}(U_{Тj*}) \quad (2)$$

$$Q_{БК}(U_{БК*}) = Q_{БКН} U_{БК*}^2 = C_Q Q_{ПН} U_{БК*}^2 \quad (3)$$

$$C_Q = Q_{БКН} / Q_{ПН} \quad (4)$$

де $P_{Тj}(U_{Тj*}), Q_{Тj}(U_{Тj*})$, активна н реактивна потужності навантаження ТПj при напрузі $U_{Тj*}$ у відносних одиницях до активної потужності навантаження $P_{ПНj} = \sum_{i=1}^n P_{ПНi}$ (або до реактивної потужності навантаження $Q_{ПНj} = \sum_{i=1}^n q_{ПНi}$) при номінальній напрузі на приймачі електроенергії;

$\Delta P_{Цj}, \Delta Q_{Цj}, \Delta P_{Тj}, \Delta Q_{Тj}, \Delta P_{Кj}, \Delta Q_{Кj}, \Delta P_{СТj}, \Delta Q_{СТj}$ - відповідно втрати активної і реактивної потужності в цеховій мережі, в цеховому трансформаторі, в кабелі живлення цехового трансформатора, в сталі цехового трансформатора у відносних одиницях до $P_{ПНj}$ або до $Q_{ПНj}$ при передаванні потужності

$Q_{БК}(U_{БК*})$ - потужність конденсаторних батарей;

C_Q - ступінь компенсації реактивної потужності, що дорівнює відношенню реактивної потужності конденсаторів БК $Q_{БКН}$ при номінальній напрузі ($U_{БК*}$) до реактивної навантаженні електроспоживачів ЕП $Q_{ПНj}$ при номінальній напрузі.

Втрати потужності в елементах електричної мережі від передачі реактивної потужності залежать від місця встановлення конденсаторних батарей (на шини ЦТП, або біля електроприймача).

Оптимізація режимів в системі електропостачання здійснюється з урахуванням втрат потужності на передачу по електричній мережі і зміни потужності приймачів електроенергії та конденсаторів при відхиленні напруги від номінальної. Потужності приймачів електроенергії та конденсаторів при реальних величинах напруги визначаються відповідно до їх статичних характеристик по напрузі. Виходячи з того, що відома напруга у електроприймачі $U_{П*}$, визначимо напругу у вузлах у відносних одиницях до номінальної $U_{ПН}$:

на шини цехової ТП

$$U_{Тj*} = U_{Пj*} + \Delta U_{Цj*} = U_{Пj*} + \frac{(A_{0j} + A_{1j} U_{Пj*}) + \varepsilon_{Цj} \operatorname{tg} \varphi_j (B_{0j} + B_{1j} U_{Пj*} + B_{2j} (U_{Пj*})^2)}{U_{Пj*}} \quad (5)$$

на шини джерела живлення:

$$U_{ДЖ*} = U_{Пj*} + \Delta U_{(ДЖ-П)*} (C_Q) \quad (6)$$

При встановленні конденсаторів на шини НН ЦТП

$$\Delta U_{(ДЖ-П)*} (C_{QT}) = K_{3A} [(V_K + V_T) \Delta U_{(ДЖ-Т)**} + V_{Ц} \Delta U_{(Т-П)**}] \quad (7)$$

$$\Delta U_{(ДЖ-Т)**} = \frac{(A_0 + A_1 U_{П*}) + \varepsilon_{(ДЖ-Т)} \operatorname{tg} \varphi (B_0 + B_1 U_{П*} + (B_2 - C_{Qj}) U_{П*}^2)}{U_{П*}} \quad (8)$$

$$\Delta U_{(Т-П)**} = \frac{(A_0 + A_1 U_{П*}) + \varepsilon_{(Т-П)} \operatorname{tg} \varphi (B_0 + B_1 U_{П*} + (B_2 - C_{Qj}) U_{П*}^2)}{U_{П*}} \quad (9)$$

при встановленні конденсаторів біля електроприймачів

$$\Delta U_{(ДЖ-П)*} (C_{QP}) = K_{3A} [(V_K + V_T + V_{Ц}) \Delta U_{(ДЖ-П)**}] \quad (10)$$

$$\Delta U_{(ДЖ-П)**} = \frac{(A_0 + A_1 U_{П*}) + \varepsilon_{(ДЖ-П)} \operatorname{tg} \varphi (B_0 + B_1 U_{П*} + (B_2 - C_{Qf}) U_{П*}^2)}{U_{П*}} \quad (11)$$

де $\varepsilon_{(ДЖ-П)} = (X_K + X_T + X_U) / (R_K + R_T + R_U)$; $\varepsilon_{(ДЖ-Т)} = (X_K + X_T) / (R_K + R_T)$, $\varepsilon_{(Т-П)} = \varepsilon_U = X_U / R_U$

$U_{ДЖ*}, U_{Т*}, U_{П*}, V_K, V_T, V_U, V_C$ -відповідно напруги на джерелі живлення, шинах ННЦТП ні узагальненому ЕП і втрати напруги (у відносних одиницях до номінальної напруги) при протіканні в активному опорі кабелю R_K , трансформатора R_T , цехової мережі R_U , в активному опорі мережі R_C потужності, що дорівнює номінальній потужності трансформатора S_{HT} .

$$V_i = \frac{S_{HT}}{(U_H)^2} R_i \quad (12)$$

Для практичних розрахунків використовують еквівалентні активні опори елементів мережі цеху та їх співвідношення [4]

Для аналізу використаємо значення різниці споживаної активної та реактивної потужностей при напрузі $U_{П*}$ і номінальній напрузі $U_{Пн*}$ і відповідно у відносних одиницях до $P_{Пн}$ (або до $Q_{Пн}$):

$$\delta P_{ДЖ}(U_{ДЖ*}) = \delta P_{П*}(U_{П*}) + \Delta P_{Уj}(U_{Уj*}) + \Delta P_{Тj}(U_{Тj*}) + \Delta P_{Kj}(U_{ДЖ*}) + \Delta P_{СТj}(U_{ДЖ*}) \quad (13)$$

$$\delta Q_{ДЖ}(U_{ДЖ*}) = \delta Q_{П*}(U_{П*}) + \Delta Q_{Уj}(U_{Уj*}) + \Delta Q_{Тj}(U_{Тj*}) + \Delta Q_{Kj}(U_{ДЖ*}) + \Delta Q_{СТj}(U_{ДЖ*}) - Q_{БКj}(U_{Тj*}) \quad (14)$$

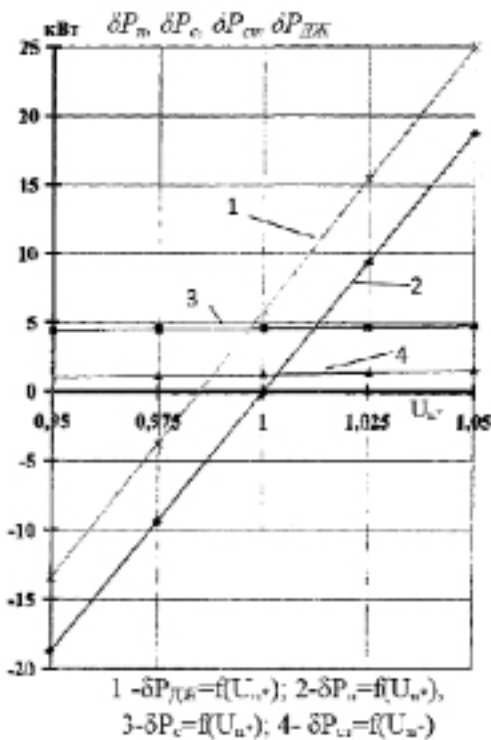


Рис. 2. Залежності різниці споживання і втрат активної потужності в кВт від напруги на ЕП для цехової мережі:

$S_{HT} = 400$ кВА, $P_{Пн} = 250$ кВт, $\operatorname{tg} \varphi = 1$, $C_Q = 0$, криві статичні характеристики

I_* - повний струм гілки у відносних одиницях до $I_H = P_{Пн} / U_H$

$$I_*^2 = \frac{(A_0 + A_1 U_{П*})^2 + (\operatorname{tg} \varphi)^2 [B_0 + B_1 U_{П*} + (B_2 - C_{Qf}) (U_{П*})^2]}{(U_{П*})^2} \quad (18)$$

Для випадку, коли батареї конденсаторів встановлені на електроспоживачів ($C_Q = C_{QП}$).

$$\Delta P_{C*} = K_{3A} (V_K + V_T + V_U) [1 + (\operatorname{tg} \varphi)^2 (1 - C_{QП})^2] \quad (19)$$

При встановленні батареї конденсаторів на шинах низької напруги трансформатора ТП, ($C_Q = C_{QT}$), отримаємо:

$$\Delta P_C = K_{3A} [(V_K + V_T) (1 + (\operatorname{tg} \varphi)^2 (1 - C_{QT})^2) + V_U (1 + (\operatorname{tg} \varphi)^2)] \quad (20)$$

Відносні втрати активної потужності в сталі трансформатора:

Рівні напруги в електромережах і компенсація реактивної потужності впливають на втрати потужності при передачі електроенергії. У свою чергу установка в цехових мережах конденсаторів впливає на рівні напруги. Тобто ці фактори режиму взаємопов'язані.

Для визначення раціональних рівнів електроспоживання використовуємо рівноважні напруги [4]. Рівноважні напруги за рахунок зменшення споживання потужності ЕП забезпечують компенсацію втрати потужності в мережі з урахуванням взаємного впливу рівнів напруг в цеховій мережі і ступеню компенсації реактивної потужності за допомогою конденсаторних батарей в цехових мережах.

$$-\delta P_{П*}(U_{П*}) = \Delta P_{C*} + \Delta P_{CT*} = 0 \quad (15)$$

Відхилення рівноважної напруги на узагальненому ЕП ($\delta U_{П*}$) визначаємо, використовуючи незалежні від рівні напруги значення втрат потужності в системі електропостачання та в сталі трансформатора $\Delta P_{C*} + \Delta P_{CT*}$ [4], та регульовальний коефіцієнт ЕП (A_1), отриманий на основі СХН ЕП

$$\delta U_{П*0} = \frac{-(\Delta P_{C*} + \Delta P_{CT*})}{A_1} \quad (16)$$

Навантажувальні втрати активної потужності

$$\begin{aligned} \Delta P_{C*} &= \Delta P_{H*} (P_{Пн}) I_*^2 = \frac{(P_{Пн})^2}{(U_{Пн})^2} R_C I_*^2 = \\ &= K_{3A} (V_K + V_T + V_U) = K_{3A} V_C I_*^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Де $R_C = R_K + R_T + R_U$

$$\Delta P_{CT*} = \frac{\Delta P_{CT}}{P_{ПН}} = \frac{\Delta P_{CT}}{K_{3A} S_{HT}} = \frac{V_{CT}}{K_{3A}} \quad (21)$$

$$V_{CT} = \frac{\Delta P_{CT}}{S_{HT}} \quad (22)$$

Таким чином, при $C_Q = C_{QP}$,

$$K_{3A} V_c [1 + (tg\varphi)^2 (1 - C_{QP})^2] + \frac{V_{CT}}{K_{3A}} \quad (23)$$

$$\delta U_{П*0(C_{QP})} = \frac{A_1}{A_1}$$

Якщо $C_Q = C_{QP}$, тоді:

$$\delta U_{П*0(C_{QP})} = \frac{K_{3A} \{ (V_K + V_T) [1 + (tg\varphi)^2 (1 - C_{QP})^2] + V_u [1 + (tg\varphi)^2] \} + \frac{V_{CT}}{K_{3A}}}{A_1} \quad (24)$$

Відхилення рівноважного рівня напруги на шинах низької напруги ТП цехової мережі U_{T*0} визначається за величиною рівноважного рівня напруги на електроспоживачі $U_{П*0}$ і втратами напруги в цеховій мережі

$$\delta U_{T*0} = \delta U_{П*0} + \Delta U_{u*} \quad (25)$$

$$\Delta U_{u*} = K_{3A} V_u \Delta U_{u**} = K_{3A} V_u (h_{0ш} + h_{0ш} U_{П*0}) = K_{3A} V_u [(A_0 + 1 - \varepsilon_u tg\varphi (B_{0л} + 1)) - (A_0 - \varepsilon_u tg\varphi (B_{0л} + C_{QP})) U_{П*0}] \quad (26)$$

Рівняння для рівноважної напруги на шинах цехової ТП має вигляд:

$$U_{T*0} = U_{П*0} + \Delta U_{u*} = D_1 D_2 + (1 - D_1 D_3) U_{П*0} \quad (27)$$

$$D_1 = K_{3A} V_u; D_2 = A_0 + 1 - \varepsilon_u tg\varphi (B_{0л} + 1); D_3 = A_0 + \varepsilon_u tg\varphi (B_{0л} + C_{QP});$$

якщо $C_Q = C_{QP}$, тоді

$$U_{П*0(C_{QP})} = 1 - \frac{K_{3A} V_c [1 + (tg\varphi)^2 (1 - C_{QP}^2)] + \frac{V_{CT}}{K_{3A}}}{A_1}; \quad (28)$$

якщо $C_Q = C_{QP}$, тоді

$$U_{П*0(C_{QP})} = 1 - \frac{K_{3A} \{ (V_K + V_T) [1 + (tg\varphi)^2 (1 - C_{QP}^2)] + V_u [1 + (tg\varphi)^2] \} + \frac{V_{CT}}{K_{3A}}}{A_1} \quad (29)$$

При регулюванні напруги ЦТП рівноважна напруга розраховується в інтерактивному режимі для основних режимів роботи СЕЦ, які визначаються з використанням статичних характеристик навантаження по напрузі (коефіцієнт A_1).

Визначення статичних характеристик комплексного навантаження ЦТП

Визначення СХН проводимо за допомогою активного експерименту, що дає можливість отримати дані для всього діапазону зміни напруги на щитах ЦТП. З огляду на нормальний закон розподілу випадкової величини використовуємо метод найменших квадратів [7].

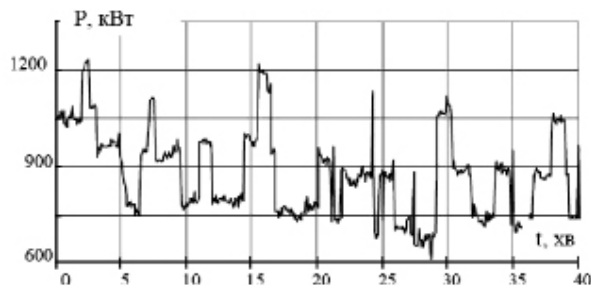
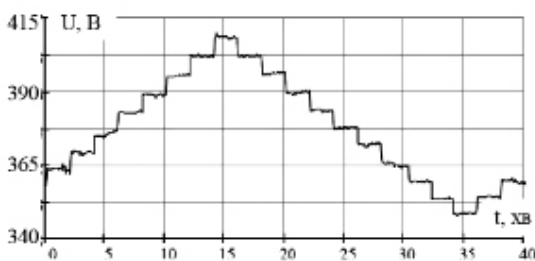


Рис. 3. Графіки зміни напруги і активної потужності при проведенні активного експерименту на шинах 0,4 кВ цехового трансформатора 1000 кВА.

Графіки зміни напруги і активної потужності при проведенні активного експерименту на шинах 0,4 кВ цехового трансформатора 1000 кВА представлені на **рис. 3.**

Оцінка допустимості коливання навантаження під час проведення дослідів виконується за такими виразами:

$$\Delta P = \frac{P_{поч} - P_{кін}}{P_{ном}} 100\% \tag{30}$$

$$\Delta Q = \frac{Q_{поч} - Q_{кін}}{Q_{ном}} 100\% \tag{31}$$

де $P_{поч}$, $Q_{поч}$ - значення споживаної активної і реактивної потужності на початку активного експерименту при вихідному номері відгалуження ПБЗ ЦТП; $P_{кін}$, $Q_{кін}$ - значення споживаної активної і реактивної потужності в кінці активного експерименту при поверненні до вихідного номеру відгалуження РПН трансформатора; $P_{ном}$, $Q_{ном}$ - базові значення споживаної активної і реактивної потужності за результатами активного експерименту (при $U_{ном}$).

Перехід від іменованих одиниць вимірювання режимних параметрів U (В), P (кВт) і Q (квар) до відносних U^* , P^* і Q^* здійснюється за виразами:

$$U^* = \frac{U}{U_{ном}} \tag{32}$$

$$P^* = \frac{P}{P_{ном}} \tag{33}$$

$$Q^* = \frac{Q}{Q_{ном}} \tag{34}$$

Визначення СХН здійснюється з використанням рівняння регресії СХН для активної і реактивної потужності у вигляді поліномів другого порядку:

$$P^* = a_0 + a_1 U^* + a_2 (U^*)^2 \tag{35}$$

$$Q^* = b_0 + b_1 U^* + b_2 (U^*)^2 \tag{36}$$

де a_0, a_1, a_2 и b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти поліномів СХН по напрузі відповідно по активній і реактивній потужностям (де $a_0 + a_1 + a_2 = 1$ і $b_0 + b_1 + b_2 = 1$).

За методом найменших квадратів [7] система рівнянь виду (35), наприклад, для активної потужності має вигляд

$$\begin{bmatrix} P_{*0} \\ P_{*1} \\ \dots \\ P_{*Mp+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & U_{*0} & U_{*0}^2 \\ 1 & U_{*1} & U_{*1}^2 \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ 1 & U_{*Mp+1} & U_{*Mp+1}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{37}$$

Система рівнянь (37) відноситься до перевизначення системам лінійних алгебраїчних рівнянь. Для вирішення системи рівнянь (37) введемо позначення:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & U_{*0} & U_{*0}^2 \\ 1 & U_{*1} & U_{*1}^2 \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ 1 & U_{*Mp+1} & U_{*Mp+1}^2 \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} P_{*0} \\ P_{*1} \\ \dots \\ P_{*Mp+1} \end{bmatrix} \tag{38}$$

Застосовуючи критерій мінімізації суми квадратів різниць правої і лівої частин системи $(\mathbf{Ax} - \mathbf{b})^T \cdot (\mathbf{Ax} - \mathbf{b}) \rightarrow \min$ отримують рішення

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{b} \tag{40}$$

де \mathbf{A}^T – транспонована матриця.

Отримані в результаті значення коефіцієнтів поліномів a_0, a_1, a_2 і b_0, b_1, b_2 є першим наближенням.

В результаті визначаються статистичні характеристики коефіцієнтів регресії, в тому числі: стандартне відхилення; рівні значущості; довірчі інтервали для коефіцієнтів регресії при заданому рівні значущості; статистичні характеристики рівняння регресії, в тому числі: множинний коефіцієнт кореляції R ; множинний коефіцієнт детермінації R^2 ; залишкової дисперсії; коефіцієнт Фішера та ін.; виключення помилок при використанні статистичних виразів, що мають складну структуру [7]. Перевірка гіпотези адекватності регресійних моделей здійснюється за допомогою критерію Фішера, для чого обчислюється залишкова дисперсія

$$D_{зал}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p - 1} \tag{41}$$

де $D_{зал}^2$ – залишкова дисперсія; Y_i – дослідні дані споживаної потужності (активної або реактивної); \hat{Y}_i – дані прогнозу споживаної потужності (активної або реактивної); n – кількість дослідів; P – кількість регресорів регресійного рівняння. Після обчислення залишкової дисперсії розраховується дисперсія середнього:

$$D_{сер}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}{n-1} \quad (42)$$

В результаті розрахунковий коефіцієнт Фішера, визначений за виразом

$$F_p = \frac{D_{сер}^2}{D_{зал}^2} \quad (43)$$

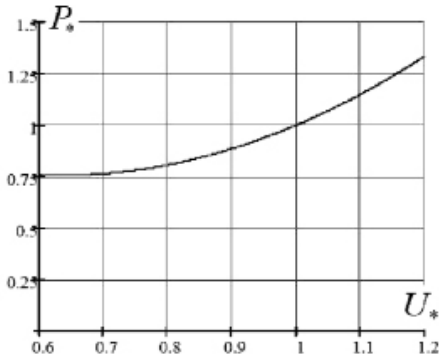


Рис. 4. Статична характеристика активної потужності навантаження по напрузі

або порівнюється з табличним значенням F_T і при задовільних результатах ($F_p > F_T$) вважається, що модель прогнозує результати досвіду краще середнього значення, або, знаючи F_p і F_T , визначається ймовірність α того, що випадкова величина Y_3 даними розподілом Фішера не перевищить прийнятий рівень значимості α_n (для інженерних розрахунків технічних об'єктів достатній рівень значимості приймається $\alpha_n = 0,05$).

За результатами виконаних на попередньому етапі розрахунків визначаються коефіцієнти a_0, a_1, a_2 і b_0, b_1, b_2 для СХН по активній і реактивній потужностях і робляться висновки про адекватність як самих коефіцієнтів, так і моделі в цілому. Для проведеного активного експерименту отримана СХН активної потужності (рис. 4) і коефіцієнти $a_0 = 1,458, a_1 = -2,233, a_2 = 1,775, a$.

Алгоритм розрахунку уставок раціонального рівня напруги регулятора напруги цехового трансформатора

На основі вимірюваних на стороні НН ЦП значень активної $P_{НН}$ і реактивної потужностей $Q_{НН}$, а також значення реактивної потужності генерованої конденсаторними батареями $Q_{БКН}$ розраховують величини коефіцієнта завантаження цехового трансформатора $k_3 = \sqrt{P_{НН}^2 + Q_{НН}^2} / S_{НТ}$; коефіцієнт реактивної потужності $tg\varphi = Q_{НН} / P_{НН}$; коефіцієнт активної потужності $\cos\varphi = P_{НН} / \sqrt{P_{НН}^2 + Q_{НН}^2}$; ступінь компенсації реактивної потужності; $C_Q = Q_{БКН} / Q_{НН}$; коефіцієнт завантаження активною потужністю $k_{3A} = k_3 \cdot \cos\varphi$. Використовуючи дані цехової електричної мережі: довжини кабельної лінії L_k , паспортні дані трансформатора, еквівалентні активні опори цехової електричної мережі цеху [4], а також застосовуючи ре-

гульовальний коефіцієнт цехової мережі за активною потужністю A_1 , отриманий за СХН цеху за рівняннями (27)...(29) розраховують значення рівноважної напруги на шинах 0,4 кВ ЦТП.

На рис. 5 представлені визначені відхилення рівноважних напруг $\delta U_{П*0}; \delta U_{Т*0}; \delta U_{ДЖ*0} = f(C_{QP})$ для різного ступеню компенсації реактивної потужності (C_{QP}) і $\delta U_{П*0}; \delta U_{Т*0}; \delta U_{ДЖ*0} = f(A_1)$ для різних видів статичних характеристик, що живляться від трансформатора 1000 кВА

Аналіз наведених графіків $\delta U_{П*0}; \delta U_{Т*0}; \delta U_{ДЖ*0} = f(C_{QP})$; для різних видів статичних характеристик показав, що при збільшенні ступеня компенсації реактивної потужності для крутих і середніх статичних характеристик $\delta U_{ДЖ*0}$ зменшується, а для пологих статичних характеристик при збільшенні C_{QP} від 0 до 0,5 збільшується (від -0,03 до -0,023), а при збільшенні C_{QP} від 0,5 до 1 зменшується (від -0,023 до -0,029) і має максимум при $C_{QP} = 0,5$. Останнє пояснюється як більш різкою зміною $\delta U_{П*0} = f(C_{QP})$, так і

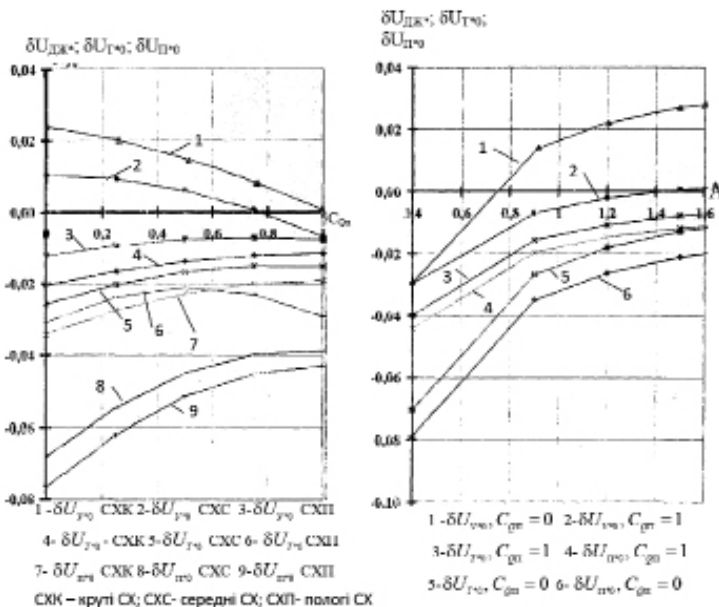


Рис. 5. Відхилення рівноважних напруги на електроспоживачі, ТП, в мережі

10 кВ для мережі з трансформатором $S_{НТ} = 1000$ кВА, $L_k = 0,5$ км, $L_{ли} = 0,1$ км, $K_3 = 0,9, tg\varphi = 1$, для різних видів статичних характеристик а) в залежності від ступеня компенсації реактивної потужності C_{QP} ; б) в залежності від A_1 при $C_{QP} = 0$ і 1.

характером зміни втрат напруги $\Delta U_{ДЖ-П} = f(U_{П})$ для пологих статичних характеристик. Природно, для всіх видів статичних характеристик $\delta U_{П*0} < \delta U_{Т*0} < \delta U_{ДЖ*0}$.

Аналіз залежності $\delta U_{П*0}; \delta U_{Т*0}; \delta U_{ДЖ*0} = f(A_1)$ показав, що при більшому ступені компенсації реактивної потужності параметри мережі не мають суттєвого впливу на $\delta U_{Т*0}$ і $\delta U_{ДЖ*0}$. Вони визначаються видом статичних характеристик, (тобто значенням A_1).

Висновки

1. Для визначення уставок регулятора напруги цехового трансформатора необхідно використовувати математичну модель системи електропостачання цеху, що базується на статичних характеристиках навантаження визначених в результаті активного експерименту.

2. Для визначення статичних характеристик навантаження необхідно використовувати метод найменших квадратів.

3. Рациональні рівні споживання електричної енергії забезпечуються при підтриманні за допомогою регулятора напруги на шинах 0,4 кВ ЦТП рівноважних напруг, які визначаються для характерних режимів споживачів на основі вимірних значень активних та реактивних потужностей, напруги, реактивної потужності генерованої конденсаторними батареями з урахуванням статичних характеристик навантаження. ■

Список використаних джерел

1. Гусаров В.А. Управление потерями электроэнергии в центрах питания на основе учета интегрированной автоматизированной системы для контроля, учета и управления энергоресурсами / В.А. Гусаров, Н.З. Султанов.- Сб. матер. Третьей научно-технической конференции «Разработки молодых ученых в области электроэнергетики 2008» / г. Москва: ОАО «НТЦ электроэнергетики», 2008. - С. 154-157.

2. Гусаров В.А. Автоматизация централизованного регулирования напряжения с использованием интегрированной АСУ энергоресурсами / В.А. Гусаров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - №3. С. 121-126.

3. Дубинский Е.В., Конюхова Е.А. Анализ влияния степени компенсации реактивной мощности и уровня напряжения на значение активной мощности, потребляемой от источника питания, с учетом статических характеристик нагрузки. // «Промышленная энергетика» -1996 - №4 - С. 35-39.

4. Конюхова Е.А. Режимы напряжений и компенсация реактивной мощности в цеховых электрических сетях. / Е.А. Конюхова - М. : НТФ Энергопрогресс, 2000. - 56 с.

5. Хорошилов, Н.В. Модель процесса принятия решения в управлении режимами электропотребления на промышленных предприятиях / Н.В. Хорошилов, В.И. Бирюлин // Объединенный научный журнал. 2005. №17 (145) июнь. С. 77-78.

6. Гуревич, Ю.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова. – М. : ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 248 с.

7. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. – М. : Финансы и статистика, 1983.

8. Учет статических характеристик нагрузки при расчетах режимов энергосистем / Д.Н. Дадонов, В.Г. Гольдштейн, Е.А. Кротков, М.М. Птичкин // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 35.–37.

9. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.А. Суворов, А.В. Паздерин, А.С. Тавлинцев и др. // Научное обозрение. –2013. – № 7. – С. 270–275. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.960-961.969.

10. Фишов, А.Г. Использование спорадических нарушений режима для определения крутизны статических характеристик узлов нагрузок / А.Г. Фишов, Д.А. Мышляников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 3. – С. 176–180.

11. Способы обработки данных активного эксперимента при определении статических характеристик мощности нагрузок узлов сети по напряжению / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золоев // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 67.–71.

12. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой / А.А. Шульпин, А.Ю. Мурзин, О.А. Бушуева и др. // Вестник Иванов. гос. энергет. ун-та. – 2014. – № 6. – С. 22–30.

13. Identification of Static Polynomial Load Model Based On Remote Metering Systems Information / A.S. Tavlintsev, A.V. Pazderin, OI. Malozemova, P.V. Chusovitin // Proc. of the 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, 1–3 November, Wroclaw, 2013. – P. 213. – 216. DOI: 10.1109/EEEIC-2.2013.6737910.

14. Static Load Modeling Using the PMU Data Installed on the University Load / J. Kim, S. Han, B. Lee et al. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2012. – No. 7(5). – P. 653–658. DOI: 10.5370/JEET.2012.7.5.653].