

## Оптимізація рівня напруги в цехових мережах промислових підприємств

Сформульована задача оптимізації рівня напруги в цеховій електричній мережі за мінімумом сукупних втрат активної потужності в електромережі і двигунах. Розкриті теоретичні засади розрахунку втрат в електричних двигунах, як функції напруги на їх затискачах та коефіцієнту завантаження. Викладена методика вибору оптимальної відпайки ПБЗ цехового трансформатора.

**втрати активної потужності, асинхронний двигун, цехова електрична мережа, рівень напруги**

**Вступ.** Підвищення ефективності, економічності електричних машин, що є головними споживачами електричної енергії на промислових підприємствах, є однією з важливих задач, яка стоїть, як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації. Якщо, на етапі проектування задаючись певними навантажувальними характеристиками, можливо звести до оптимального мінімуму втрати в електричній машині, то на етапі експлуатації підвищити ефективність роботи можливо лише шляхом підтримання номінальних значень проектних параметрів, до яких слід віднести напругу живлення та коефіцієнт завантаження. Однією з головних причин збільшення витрати електричної енергії та зменшення ефективності роботи електричних машин є зменшення навантаження нижче проектного, що може бути викликано, як особливостями технологічного процесу, так і вимушеним зменшенням продуктивності підприємства в цілому.

**Постановка задачі.** Підвищити коефіцієнт завантаження або використовувати електричні двигуни меншої потужності в робочих машинах не завжди є можливим. Тому, в таких випадках підвищити ефективність роботи можливо лише шляхом зменшення напруги живлення в допустимих межах [1]. Зменшення напруги, в свою чергу призведе до збільшення втрат в системі електропостачання, що вимагатиме сукупного розгляду втрат електроенергії в електродвигунах і мережі, як єдиному цілому для пошуку оптимального значення рівня напруги живлення.

**Аналіз публікацій.** У випадку зміни напруги живлення асинхронного двигуна активна потужність на валу залишається практично не змінною, змінюються лише втрати активної потужності в двигуні на деяку величину  $\delta P$ , яка може бути додатною або від'ємною в залежності від напрямку зміни напруги, типу двигуна і його коефіцієнту завантаження  $k_3$ . В загальному випадку для трифазних асинхронних двигунів зміна активної потужності  $P_{\text{дв}}$ , що споживається ними, визначається з наступного виразу [1, 2]:

$$P_{\text{дв}} = k_3 P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{ном}} + \delta P = k_3 P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{ном}} (1 + k_{\text{п}}), \quad (1)$$

де  $\Delta P_{\text{ном}}$  – втрати активної потужності в двигуні при номінальній напрузі на його затискачах;

$k_{\text{п}}$  – коефіцієнт пропорційності, дорівнює відношенню додаткових втрат активної потужності в двигуні  $\delta P$  до величини  $\Delta P_{\text{ном}}$ .

Величина додаткових втрат  $\delta P$ , що викликана зміною напруги мережі суттєво залежить від коефіцієнта завантаження двигуна  $k_3$ . В [2] наведені графіки залежності зміни втрат активної потужності в асинхронних двигунах серії А і АО напругою 380 В від зміни напруги живлення у межах  $\pm 10\%$  від номінальної для двигунів потужністю 1–100 кВт, що мають синхронну частоту обертання 1000-3000 об/хв. Аналіз кривих з [2] дозволяє зробити наступні висновки:

- при коефіцієнтах завантаження двигунів робочих агрегатів близьких до 1 краще тримати напругу в мережі близькою до верхньої допустимої межі;
- при коефіцієнті завантаження близькому до 0,5 краще тримати напругу в мережі близькою до нижньої допустимої межі;
- при коефіцієнті завантаження близькому до 0,75 бажано тримати напругу близькою до номінальної, але можливі випадки коли при такому коефіцієнті завантаження бажано буде тримати напругу ближчу до верхньої межі.

Отже, відсутність чітких рекомендацій по вибору напруги, при коефіцієнті завантаження біля 0,75, та взагалі відсутність рекомендацій по вибору напруги для групи двигунів з різними коефіцієнтами завантаження, а також відсутність методики розрахунку величини зміни втрат для кількісної оцінки, вимагає подальшого удосконалення методики вибору рівня напруги системи електропостачання.

**Мета статті.** Отримання аналітичних виразів для розрахунку втрат в асинхронних двигунах, формулювання оптимізаційної задачі вибору рівня напруги, розробка методики вибору оптимальної відпайки ПБЗ цехового трансформатора.

**Основна частина.** Вихідними довідковими даними для розрахунку втрат в асинхронному двигуні є  $P_{2\text{ном}}$ ,  $U_\phi$ ,  $\cos\phi_{\text{ном}}$ ,  $\eta_{\text{ном}}$ ,  $s_{\text{ном}}$ ,  $M_{\text{max*}}$ ,  $X_\mu$ ,  $R'_1$ ,  $X'_1$ ,  $R''_2$ ,  $X''_2$ ,  $n_1$ , які вибираються з [3] в залежності від марки встановленого двигуна. У разі відсутності в довідковій літературі параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна  $X_\mu$ ,  $R'_1$ ,  $X'_1$ ,  $R''_2$ ,  $X''_2$ , вони можуть бути отримані з дослідів холостого ходу і короткого замкнення. Параметри  $P_{2\text{ном}}$ ,  $U_\phi$ ,  $\cos\phi_{\text{ном}}$ ,  $\eta_{\text{ном}}$ ,  $s_{\text{ном}}$  можна знайти в паспорті двигуна.

Опори  $X_1$  і  $R_1$  (рис. 1) можуть бути обчислені за наступними формулами:

$$X_1 \approx \frac{2 \cdot X'_1 \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4 \cdot X'_1 \cdot X_\mu}}, \quad R_1 = R'_1 \cdot X_1 / X'_1, \quad (2)$$

де  $X_\mu$  – індуктивний опір магнітного кола двигуна;

$R'_1$ ,  $X'_1$  – активний та індуктивний опори статора відповідно;

$R''_2$ ,  $X''_2$  – активний та індуктивний опори ротора відповідно, приведені до кола статора.

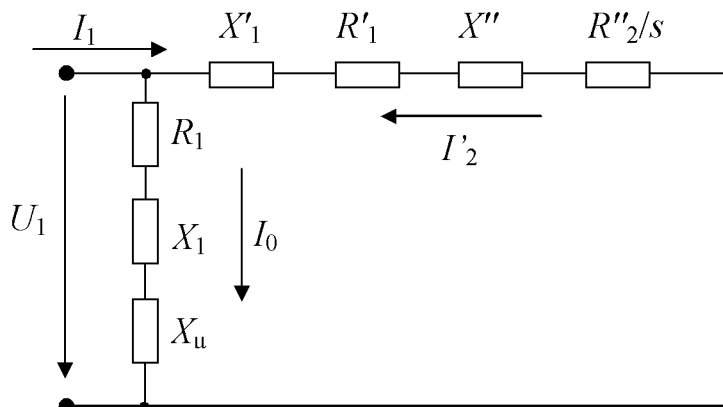


Рисунок 1 - Схема заміщення асинхронного двигуна

Залежності  $\eta$  і  $\cos\phi$  асинхронного двигуна від напруги на його затискачах при різних навантаженнях виражаються наступними виразами [4]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma \Delta P}{P_2}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - s_{\text{НОМ}}}{P_{2\text{НОМ}} \cdot M_*} \right) \cdot \left[ \frac{\Delta P_{\text{м.НОМ}} \cdot k_U^4 + \Delta P_{\text{ел.НОМ}} \cdot M_*^2 + \Delta P_{\text{мех.НОМ}} \cdot \left( \frac{k_U^2 - s_{\text{НОМ}}}{1 - s_{\text{НОМ}}} \right)}{k_U^2 - s_{\text{НОМ}} \cdot M_*} \right]}, \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{I'_{2\text{НОМ}} \cdot M_* / k_U}{\sqrt{\left( I_{0\text{НОМ}} \cdot k_U + I'_{2\text{НОМ}} \cdot M_* / (2 \cdot M_{\text{макс}} \cdot k_U^3) \right)^2 + \left( I'_{2\text{НОМ}} \cdot M_* / k_U \right)^2}}, \quad (4)$$

де  $s_{\text{НОМ}}$  – ковзання у номінальному режимі;

$P_{2\text{НОМ}}$  – потужність на валу двигуна у номінальному режимі;

$M_*$  – коефіцієнт завантаження двигуна,  $M_* = M / M_{\text{НОМ}}$ ;

$\Delta P_{\text{м.НОМ}}$  – втрати потужності магнітного ланцюга двигуна при номінальному режимі його роботи;

$\Delta P_{\text{ел.НОМ}}$  – втрати потужності в обмотках статора та ротора двигуна при номінальному режимі його роботи;

$\Delta P_{\text{мех.НОМ}}$  – механічні втрати потужності у номінальному режимі;

$M_{\text{макс}} = M_{\text{макс}} / M_{\text{НОМ}}$  – відносне значення максимального моменту.

$I_{0\text{НОМ}}$  і  $I'_{2\text{НОМ}}$  – значення струму вітки намагнічування

$$I_{0\text{НОМ}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{\mu})^2}}$$

і струму навантажувальної гілки

$$I'_{2\text{НОМ}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(r_1' + C_1 \cdot r_2'' / s)^2 + (x_1' + C_1 \cdot x_2'')^2}};$$

$$C_1 = 1 + \frac{x_1'}{x_{\mu}};$$

$k_U = U_1 / U_{1\text{НОМ}}$  – коефіцієнт регулювання напруги.

Розрахунок втрат потужності номінального режиму проводиться за наступними формулами:

$$\Delta P_{\text{м.НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - \Delta P_{\text{ел1НОМ}} - P_{\text{ем.НОМ}}, \quad (5)$$

де  $P_{1\text{НОМ}}$  – номінальна потужність, яку двигун споживає з електричної мережі

$$P_{1\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \quad \text{або} \quad P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}};$$

$\Delta P_{\text{ел.НОМ1}} = m_1 \cdot I_{1\text{НОМ}}^2 \cdot R_1$  – втрати потужності в обмотці статора при номінальному режимі;

$m_1$  – числом фаз статора;

$P_{\text{ем.НОМ}} = M_{\text{НОМ}} \cdot \omega_1$  – номінальна електромагнітна потужність АД;

$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}$  – синхронна кутова швидкість вала двигуна;

$M_{\text{НОМ}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}}$  – номінальний електромагнітний момент.

$$\Delta P_{\text{ел.ном}} = \Delta P_{\text{ел.ном1}} + \Delta P_{\text{ел.ном2}} = m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_1 + m_1 \cdot I_{2\text{ном}}^2 \cdot R_2', \quad (6)$$

$\Delta P_{\text{ел2.ном}}$  – втрати потужності в обмотці ротора при номінальному режимі.

За значенням  $\cos \varphi$  (3) та  $\eta$  (4), при певному значенні коефіцієнта завантаження  $M^*$  і коефіцієнта регулювання напруги  $k_U$ , можна знайти потужності, що споживає двигун з мережі під час роботи:

$$P_1 = P_{2\text{ном}} \cdot M^* / \eta, \quad S_1 = P_1 / \cos \varphi, \quad Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}. \quad (7)$$

Ці потужності є вихідними для розрахунку втрат в системі електропостачання.

Втрати потужності в кабельній лінії (шинопроводі) визначаються за формулами:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \frac{P_{\text{кл}}^2 + Q_{\text{кл}}^2}{U_{\text{кл}}^2} R_{\text{кл}}, \quad \Delta Q_{\text{кл}} = \frac{P_{\text{кл}}^2 + Q_{\text{кл}}^2}{U_{\text{кл}}^2} X_{\text{кл}}, \quad (8)$$

де  $P_{\text{кл}}$ ,  $Q_{\text{кл}}$  – активна та реактивна потужність у початковій точці розрахунку;

$R_{\text{кл}}$ ,  $X_{\text{кл}}$  – активний та індуктивний опори кабельної лінії (шинопроводу);

$U_{\text{кл}}$  – напруга кабельної лінії (шинопроводу) у початковій точці розрахунку.

Враховуючи, що втрати потужності в двигунах і мережі залежать від напруги, то для якісного розрахунку необхідно визначити напругу в усіх точках системи електропостачання. Як правило, розрахунок ведеться для відхилення напруги від номінального, за значенням якого і визначається напруга в потрібних точках, а також порівнюється відхилення напруги з встановленим ГОСТ 13109-97.

Відхилення напруги визначається за формулою [5]:

$$V = V_{\text{цж}} - \sum_{j=1}^n \Delta U_j + \sum_{i=1}^m \delta U_i, \quad (9)$$

де  $V_{\text{цж}}$  – відхилення напруги на шинах центру живлення, %;

$\sum_{j=1}^n \Delta U_j$  – сума втрат напруги в елементах мережі, %;

$\sum_{i=1}^m \delta U_i$  – сума додатків напруги за рахунок різних коефіцієнтів трансформації

трансформаторів, підключення батарей конденсаторів, %.

Втрата напруги в повітряних (ПЛ), кабельних (КЛ) лініях та шинопроводах знаходиться за формулами:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{P_{\text{л}} \cdot R + Q_{\text{л}} \cdot X}{10 \cdot U^2}, \% \quad \text{або} \quad \Delta U_{\text{л}} = \frac{(r_0 + x_0 \cdot \text{tg} \varphi) \cdot P \cdot l}{10 \cdot U^2}, \% \quad (10)$$

де  $P_{\text{л}}$ ,  $Q_{\text{л}}$  – активні і реактивні потужності, кВт, квар;

$R$ ,  $X$  – активний та реактивний опір ПЛ, КЛ або шинопроводу, Ом;

$U$  – напруга у точці підключення, кВ;

$r_0$ ,  $x_0$  – питомий індуктивний та активний опір ПЛ, КЛ або шинопроводу, Ом/км;

$\text{tg} \varphi = P_{\text{л}} / Q_{\text{л}}$  – коефіцієнт реактивної потужності навантаження лінії;

$l$  – довжина лінії, шинопроводу, км.

Завданням оптимізації рівня напруги є вибір такого значення  $V_{цж}$  при якому буде мінімум сумарних втрат активної потужності в цеховій електричній мережі та електродвигунах

$$\Sigma \Delta P(V_{цж}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

при обмежених межах регулювання напруги

$$0,95 \cdot U_{ном} \leq U_i \leq 1,05 \cdot U_{ном}. \quad (12)$$

Сумарні втрати визначаються за формулою:

$$\Sigma \Delta P = \Sigma \Delta P_{мер} + \Sigma \Delta P_{дв}, \quad (13)$$

де  $\Sigma \Delta P_{мер}$  – сумарні втрати активної потужності в цеховій мережі, визначаються за (8);

$$\Sigma \Delta P_{дв} = \sum K_3 \cdot P_{2ном} \cdot \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) - \text{сумарні втрати в електродвигунах цеху};$$

$\eta$  – ККД двигуна знаходиться за (3);

$K_3$  – коефіцієнт завантаження двигуна дорівнює  $M^*$ .

Регулювання напруги в цеховій електричній мережі, як правило, здійснюється переключенням відпайок трансформатора з ПБЗ, яке має п'ять відгалужень ( $\pm 5\%$  з кроком  $2,5\%$ ). Отже, при виборі оптимального рівня напруги існує лише 5 варіантів можливих значень напруги центру живлення. Така невелика кількість можливих варіантів дозволяє при пошуку мінімуму функції (13) скористатися методом повного перебору. При цьому, здійснюючи розрахунок потрібно враховувати умову (12) для кожного  $i$ -го електроприймача і у випадку, якщо вона не виконується, то такий варіант із можливих слід виключити.

Пошук мінімуму функції (13) здійснюється в наступній послідовності:

1. За значеннями коефіцієнтів завантаження робочих двигунів визначається споживана потужність двигунами з мережі  $P_{1i}$  та  $Q_{1i}$ . При цьому вважається на першій ітерації, що напруга на затискачах двигуна дорівнює номінальній.

2. Проводиться розрахунок електричної мережі по потужності.

3. Проводиться розрахунок електричної мережі по напрузі. При цьому за напругу центру живлення береться напруга, яка відповідає крайній (найменшій або найбільшій) відпайці трансформатора.

4. За значеннями напруги у вузлах  $U_i$  визначаються нові значення споживаної потужності двигунами з мережі  $P_{1i}$  та  $Q_{1i}$ .

5. Розрахунок по п. 2, 3 і 4 повторюється поки зміна напруги у вузлах або споживаної потужності стане менше за деяку наперед задану нев'язку.

6. Визначаються втрати активної потужності в двигунах та електричній мережі. Розраховується значення цільової функції за формулою (13).

7. Змінюється відпайка трансформатора центру живлення та розрахунок по п. 1-6 повторюється. Таким чином перебираються усі відпайки трансформатора.

8. Перевіряються значення відхилення напруги на затискачах електроприймачів розраховані з різними відпайками трансформатора. Якщо умова (12) не виконується варіант з даним відгалуженням відкидається.

9. Серед варіантів, які залишилися після п. 8 вибирається той, який має найменше значення цільової функції. Відповідно і значення відпайки ПБЗ цехового трансформатора, яке відповідає цьому значенню буде оптимальне.

Розроблена методика розрахунку вибору оптимального значення рівня напруги в цеховій мережі може бути використана в системі енергетичного менеджменту підприємства з метою підвищення ефективності роботи цехового обладнання та економії електроенергії.

#### **Висновки.**

1. Розкриті теоретичні засади розрахунку втрат в електричних двигунах, як функції напруги на їх затискачах та коефіцієнту завантаження.

2. На основі проведених досліджень сформована цільова функція оптимізаційної задачі вибору рівня напруги у цеховій мережі, в якій поєднаний розрахунок втрат активної потужності в лініях електропередачі з розрахунком втрат в електродвигунах.

3. Розроблена методика пошуку мінімуму цільової функції, яка дозволяє розрахувати за заданими значеннями коефіцієнтів завантаження та параметрами електричної мережі і двигунів визначити відгалуження, що відповідатиме мінімуму сукупних втрат активної потужності.

#### **Список літератури**

1. Плешков П.Г. Моніторинг якості електричної енергії у системі енергетичного менеджменту підприємства / П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, О.І. Сіріков, Г.В. Безкровна // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 102 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2010. - С.36-37.
2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1. Электроснабжение/ Под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.:ил.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. — М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.
4. Радин В. И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов/Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е.; Под ред. И. П. Копылова — М.: Высш. шк., 1988.—328 с: ил.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях – 4-е изд., переаб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с., 87 ил.

*П. Плешков, А. Сириков, Г. Безкровная*

#### **Оптимизация уровня напряжения в цеховых сетях промышленных предприятий**

Сформулирована задача оптимизации уровня напряжения в цеховой электрической сети по минимуму совокупных потерь активной мощности в электросети и двигателях. Раскрыты теоретические принципы расчета потерь в электрических двигателях, как функции напряжения на их зажимах и коэффициента загрузки. Изложена методика выбора оптимальной отпайки ПБВ цехового трансформатора.

*P. Pleshkov, A. Sirikov, H. Bezкровna*

#### **Optimization of level of voltage in the workshop networks of industrial enterprises**

The task of optimization of level of voltage is formulated in a workshop electric network on a minimum of the combined losses of active-power in the electric system and engines. Theoretical principles of calculation of losses are exposed in electric engines, as function of voltage on their clamps and load factor. The method of choice of optimum leading-out wire of workshop transformer is expounded.

Одержано 28.03.11