УДК 621.313, 621.316.1

О.І. СІРІКОВ, канд. техн. наук, доц., КНТУ, Кіровоград
Г.В. БЕЗКРОВНА, магістр, КНТУ, Кіровоград

ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ “ЕЛЕКТРОДВИГУН – ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ” ШЛЯХОМ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ НАПРУГИ

Розкриті теоретичні засади розрахунку втрат в асинхронних двигунах, як функції напруги на їх затискачах та коефіцієнту завантаження. Сформульована задача оптимізації рівня напруги в цеховій електричній мережі за мінімумом сукупних втрат активної потужності в електромережі і двигунах.

Раскрытые теоретические основы расчета потерь в асинхронных двигателях, как функции напряжения на их зажимах и коэффициента загрузки. Сформулирована задача оптимизации уровня напряжения в цеховой электрической сети за минимумом совокупных потерь активной мощности в электросети и двигателях.

Вступ. Однією з головних причин збільшення витрати електричної енергії та зменшення ефективності роботи електричних машин є зменшення навантаження нижче проектного, що може бути викликане, як особливостями технологічного процесу, так і вимушеним зменшенням продуктивності підприємства в цілому. 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.

Постановка задачі. Підвищити коефіцієнт завантаження або використовувати електричні двигуни меншої потужності в робочих машинах не завжди є можливим. В таких випадках збільшити ефективність роботи можливо шляхом зменшення напруги живлення в допустимих межах [1, 2]. 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. Величина додаткових втрат, що викликана зміною напруги мережі суттєво залежить від коефіцієнта завантаження двигуна. В [3] наведені графіки залежності зміни втрат активної потужності в асинхронних двигунах серії А і АО напругою 380 В від зміни напруги живлення у межах ±10% від номінальної для двигунів потужністю 1–100 кВт, що мають синхронну частоту обертання 1000-3000 об/хв. Аналіз кривих з [3] 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.

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 $P_{2ном}$, $U_ф$, $\cos\varphi_{ном}$, $\eta_{ном}$, $s_{ном}$, M_{max*}, $X_μ$, R'_1, X'_1, R''_2, X''_2, n_1, які вибираються з [4] в залежності від марки встановленого двигуна. У разі відсутності в довідковій літературі параметрів схемі заміщення асинхронного двигуна $X_μ$, R'_1, X'_1, R''_2, X''_2, вони можуть бути отримані з дослідів холостого ходу і короткого замкнення. Параметри $P_{2ном}$, $U_ф$, $\cos\varphi_{ном}$, $\eta_{ном}$, $s_{ном}$ можна знайти в паспорті двигуна.

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

$$X_1 \approx \frac{2 \cdot X_1^{'} \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4 \cdot X_1^{'} \cdot X_\mu}}; \; R_1 = R_1^{'} \cdot X_1 \Big/ X_1^{'},$$

де $X_μ$ – 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.

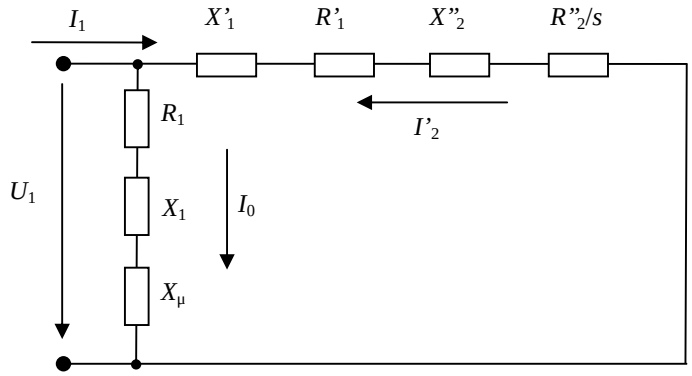


Рис. Схема заміщення асинхронного двигуна.

Залежності η і cosφ асинхронного двигуна від напруги на його затискачах при різних навантаженнях виражаються наступними виразами [5]:

$$\eta = 1 \Big/ \left(1 + \left(\frac{1 - s_{ном}}{P_{2ном} \cdot M_*}\right) \cdot \left[\frac{\Delta P_{м.ном} \cdot k_U^4 + \Delta P_{ел.ном} \cdot M_*^2 + \Delta P_{мех.ном} \cdot \left(\frac{k_U^2 - s_{ном}}{1 - s_{ном}}\right)}{k_U^2 - s_{ном} \cdot M_*}\right]\right); \qquad (1)$$

$$\cos\varphi = \frac{I'_{2ном} \cdot M_* \Big/ k_U}{\sqrt{\left(I_{0ном} \cdot k_U + I'_{2ном} \cdot M_*^2 \Big/ \left(2 \cdot M_{мах*} \cdot k_U^3\right)\right)^2 + \left(I'_{2ном} \cdot M_* \Big/ k_U\right)^2}}; (2)$$

де $s_{ном}$ – ковзання у номінальному режимі; $P_{2ном}$ – потужність на валу двигуна у номінальному режимі; M_* – коефіцієнт завантаження двигуна, $M_* = M / M_{ном}$; $\Delta P_{м.ном}$ – втрати потужності магнітного ланцюга двигуна при номінальному режимі його роботи; $\Delta P_{ел.ном}$ – втрати потужності в обмотках статора та ротора двигуна при номінальному режимі його роботи; $\Delta P_{мех.ном}$ – механічні втрати потужності у номінальному режимі; $M_{мах*} = M_{мах} / M_{ном}$ – відносне значення максимального моменту. $I_{0ном}$ і $I'_{2ном}$ – значення струму вітки намагнічування

$$I_{0ном} = \frac{U_ф}{\sqrt{r_1^2 + \left(x_1 + x_\mu\right)^2}}$$

і струму навантажувальної гілки

$$I'_{2ном} = \frac{U_ф}{\sqrt{\left(r'_1 + C_1 \cdot r''_2 / s\right)^2 + \left(x'_1 + C_1 \cdot x''_2\right)^2}}; C_1 = 1 + \frac{x'_1}{x_\mu};$$

$k_U = U_1 / U_{1ном}$ – коефіцієнт регулювання напруги.

Розрахунок втрат потужності номінального режиму проводиться за наступними формулами:

$$\Delta P_{м.ном} = P_{1ном} - \Delta P_{ел1ном} - P_{ем.ном},$$

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

$$P_{1ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном} \cdot \cos\varphi_{ном} \text{ або } P_{1ном} = P_{2ном} / \eta_{ном};$$

$\Delta P_{ел.ном1} = m_1 \cdot I_{1ном}^2 \cdot R_1$ – втрати потужності в обмотці статора при номінальному режимі; m_1 – число фаз статора;

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

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

$M_{ном} = 9550 \cdot P_{ном} / n_{ном}$ – номінальний електромагнітний момент.

$$\Delta P_{ел.ном} = \Delta P_{ел.ном1} + \Delta P_{ел.ном2} = m_1 \cdot I_{1ном}^2 \cdot R_1 + m_1 \cdot I_{2ном}^{'2} \cdot R'_2,$$

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

За значенням η (1) та cosφ (2), при певному значенні коефіцієнта завантаження M_* і коефіцієнта регулювання напруги k_U, можна знайти потужності, що споживає двигун з мережі під час роботи:

$$P_1 = P_{2.ном} \cdot M_* / \eta;\ S_1 = P_1 / \cos\varphi;\ Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}.$$

Ці потужності є вихідними для розрахунку втрат в системі електропостачання. Втрати потужності в кабельній лінії (шинопроводі) визначаються за формулами:

$$\Delta P_{кл} = \frac{P_{кл}^2 + Q_{кл}^2}{U_{кл}^2} R_{кл};\ \Delta Q_{кл} = \frac{P_{кл}^2 + Q_{кл}^2}{U_{кл}^2} X_{кл},$$

де $P_{кл}$, $Q_{кл}$ – активна та реактивна потужність у початковій точці розрахунку; $R_{кл}$, $X_{кл}$ – активний та індуктивний опори кабельної лінії (шинопроводу); $U_{кл}$ – 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 [6]:

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

де $V_{цж}$ – 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:

$$\Delta U_л = \frac{P_л \cdot R + Q_л \cdot X}{10 \cdot U^2},\ \%\ \text{або}\ \Delta U_л = \frac{\left(r_0 + x_0 \cdot tg\varphi\right) \cdot P \cdot l}{10 \cdot U^2},\ \%$$

де $P_л$, $Q_л$ – активні і реактивні потужності лінії, 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; $tg\varphi = P_л / Q_л$ – 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

$$\Sigma\Delta P\left(V_{цж}\right) \to min \,, \qquad (3)$$

при обмежених межах регулювання напруги

$$0{,}95 \cdot U_{ном} \le U_i \le 1{,}05 \cdot U_{ном} \,. \qquad (4)$$

Сумарні втрати визначаються за формулою:

$$\Sigma\Delta P = \Sigma\Delta P_{мер} + \Sigma\Delta P_{дв} \,, \qquad (5)$$

де $\Sigma\Delta P_{мер}$ – сумарні втрати активної потужності в цеховій мережі; $\Sigma\Delta P_{дв} = \sum K_з \cdot P_{2ном} \cdot \left(1/\eta - 1\right)$ – сумарні втрати в електродвигунах цеху; η – ККД двигуна знаходиться за (1); $K_з$ – коефіцієнт завантаження двигуна дорівнює M_*..

Регулювання напруги в цеховій електричній мережі, як правило, здійснюється переключенням відпайок трансформатора з ПБЗ, яке має п’ять відгалужень (± 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 (3) скористатися методом повного перебору. При цьому, здійснюючи розрахунок потрібно враховувати умову (4) для кожного i-го електроприймача і у випадку, якщо вона не виконується, то такий варіант із можливих слід виключити.

Пошук мінімуму функції (3) 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 (5).
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 (4) не виконується варіант з даним відгалуженням відкидається.

9. Серед варіантів, які залишились 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.

До недоліків запропонованої методики слід віднести те, що коефіцієнти завантаження двигунів та значення напруги центру живлення не є сталими, а являють собою певні імовірнісні величини. А отже, до напрямків подальших досліджень та удосконалення методики вибору оптимального рівня напруги слід віднести необхідність врахування імовірнісного характеру навантаження робочих машин та напруги центру живлення.

Висновки.

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

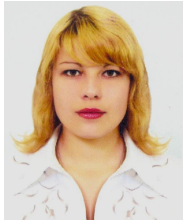
2. На основі проведених досліджень сформована цільова функція оптимізаційної задачі вибору рівня напруги у цеховій мережі, в якій поєднаний розрахунок втрат активної потужності в лініях електропередачі з розрахунком втрат в електродвигунах.

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.

4. Запропонована методика потребує удосконалення шляхом врахування імовірнісного характеру коефіцієнтів завантаження асинхронних двигунів та напруги центру живлення.

Список літератури: 1. *Плєшков П. Г.* Оптимізація рівня напруги в цехових мережах промислових підприємств. / *П. Г. Плєшков, О. І. Сіріков, Г. В. Безкровна* // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація /. – Вип. 24.Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2011. С. 237-242. **2.** *Плєшков П.Г.* Моніторинг якості електричної енергії у системі енергетичного менеджменту підприємства / *П. Г. Плєшков, 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. **3.** Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1. Электроснабжение / Под общ. ред. *А. А. Федорова*. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.:ил. **4.** Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / *А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская*. — М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил. **5.** *Радин В. И.* Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов / *В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович*; Под ред. *И. П. Копылова* — М.: Высш. шк., 1988. – 328 с: ил. **6.** *Жеженко И. В.* Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / *И. В. Жеженко, Ю. Л. Саенко* – 4-е изд., передаб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с., 87 ил.

Сіріков Олександр Іванович, кандидат технічних наук. Захистив диплом магістра в Кіровоградському державному технічному університеті у 2003 р. за спеціальністю “Електротехнічні системи електроспоживання”. Дисертацію кандидата технічних наук захистив у 2009 р. в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за спеціальністю “Прилади і методи контролю та визначення складу речовин”. Доцент кафедри “Електротехнічні системи” Кіровоградського національного технічного університету з 2011 р.
Наукові інтереси пов’язані з проблемами діагностики стану забрудненої високовольтної ізоляції, підвищення ефективності електропостачання електричних машин.



Безкровна Галина Вадимівна. Захистила диплом магістра в Кіровоградському національному технічному університеті у 2011 р. за спеціальністю “Електротехнічні системи електроспоживання”.
Наукові інтереси пов’язані з проблемами підвищення ефективності роботи електричних машин.

Надійшла до редколегії 16.09.2011