

## ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ І ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕТАЛОНІВ ДЛЯ СИСТЕМ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

*О. О. Закладний, інж., О. М. Закладний, канд. техн. наук, І. В. Притискач, студ. (НТУУ «КПІ»)*

*Приведена энергетическая модель для расчетов статических характеристик и энергетических параметров энергопотребления и энергоиспользования асинхронного электропривода, а также результаты математического моделирования двигателей промышленной серии 5А.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, мониторинг, энергетическая модель, мощность, потери, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.*

*Наведено енергетичну модель для розрахунків статичних характеристик та енергетичних параметрів енергоспоживання і енерговикористання асинхронного електроприводу, а також результати математичного моделювання двигунів промислової серії 5А.*

*Ключові слова: асинхронний двигун, моніторинг, енергетична модель, потужність, втрати, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності.*

*The energy model for the calculation of static characteristics and energy parameters of power consumption and power usage of induction motor, as well as the results of mathematical modeling of new industrial engines series 5A are presented.*

*Key words: induction motor, monitoring, energy model, power losses, efficiency, power factor.*

**Вступ.** Практика показує, що з погляду аварійності найбільш уразливим електроустаткуванням є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (АД), на які припадає до 50 % всіх аварій. Переважна більшість аварій викликані електричними ушкодженнями через низьку енергоефективність роботи електроприводу.

Для визначення впливу різноманітних факторів на ефективність процесу перетворення енергії АД проводять статистичні вимірювання діагностичних параметрів (фазних струмів, напруг) з подальшою їх оцінкою. В системі функціонального моніторингу вихідні дані діагностичної моделі порівнюються з даними енергетичної моделі формування і збереження еталонів, від якої залежить оцінка достовірності отриманих результатів і висновків.

**Аналіз стану проблеми.** Дослідження ряду встановлених АД показали, що більшість їх завантажена неправильно. Недовантажені двигуни, які працюють із навантаженням, меншим ніж 50 % номінального, використовуються неефективно і мають низькі енергетичні показники. Наприклад, низький коефіцієнт потужності збільшує втрати в розподільних пристроях і трансформаторах, а також призводить до зниження навантажувальної здатності всієї системи електропостачання. Для аналізу

процесу перетворення енергії АД в режимі реального часу в системах моніторингу використовують енергетичні моделі двигунів.

**Метою роботи** є розроблення енергетичної моделі для розрахунків статичних характеристик та робочих параметрів енергоспоживання й енерговикористання АД в номінальному режимі, а також встановлення характеру залежностей енергетичних параметрів від номінальної потужності та завантаження для двигунів промислової серії 5А.

**Викладення основного матеріалу.** Побудова енергетичних моделей формування і збереження еталонів для систем функціонального моніторингу АД ґрунтується на використанні паспортних даних та схем заміщення електродвигунів [1, 2, 3] і повинна враховувати характер навантаження – графіки навантажень (ГН).

У каталогах на АД з короткозамкненим ротором наводяться такі паспортні дані [4,5]:  $P_H$  – номінальна потужність на валу;  $n_H$  – номінальна частота обертання ротора;  $U_{HY}/U_{HA}$  – номінальні напруги при з'єднанні обмоток у схему «зірка» або «трикутник» відповідно;  $I_{HY}/I_{HA}$  – відповідні номінальні струми;  $f_H$  – номінальна частота мережі;  $\eta_H$  – номінальний ККД;  $\cos\varphi_H$  – номінальний коефіцієнт потужності;  $J_{дв}$  – момент інерції двигуна або маховий момент;  $\lambda = M_K/M_H$  – перевантажувальна здатність;  $\lambda_M = M_{II}/M_H$  – кратність пускового моменту;  $\lambda'_M = M_{MIN}/M_H$  – кратність мінімального моменту;  $\lambda_{II} = I_{II}/I_H$  – кратність пускового струму; клас ізоляції (A, B, F, H); ступінь захисту (IP54, IP55); кліматичне виконання (У2,Т2).

Деякі виробники наводять також типові характеристики –  $\cos\varphi(P)$  і  $\eta(P)$  [4]. Для двигунів з фазним ротором зазначається ЕРС на розімкнутих кільцях загальмованого ротора  $E_{2H}$  при  $U_H$  і номінальний струм ротора  $I_{2H}$ .

Визначимо параметри кіл АД і втрати потужності в них за паспортним даними. Припущення: двигун живиться номінальною напругою стандартної частоти; електромагнітний момент двигуна приймається таким, що дорівнює моменту на валу; не враховуються механічні втрати в двигуні, які за необхідності можуть бути віднесені до його навантаження.

Споживана потужність визначається інтегральним виразом

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt, \quad (1)$$

який являє собою середнє за період значення миттєвої потужності  $p = ui$  і за синусоїдальних напруг живлення для трифазного АД при сполученні його обмоток у схему «зірка» і «трикутник», визначається за формулами

$$P_1 = 3I \frac{U}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3}UI \cos\varphi; \quad (2)$$

$$P_1 = 3I \frac{I}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3}UI \cos\varphi, \quad (3)$$

де  $U$  – діюче значення напруги мережі;  $I$  – діюче значення струму мережі.

Номінальній споживаній потужності  $P_{\text{IH}}$  у формулах відповідають номінальні напруга, струм і коефіцієнт потужності.

Для трифазного кола за симетричного навантаження фаз реактивна потужність

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi. \quad (4)$$

Енергетична характеристика процесу енергоспоживання – коефіцієнт потужності АД [6, 7]. Якщо ГН електроприводу циклічний з різними значеннями навантаження або швидкості, то він, як споживач реактивної енергії, характеризується середньозваженим або цикловим коефіцієнтом потужності, який визначається відношенням спожитої активної енергії за цикл  $W_A$  до повної енергії  $W$  відповідно до формули

$$\cos \varphi = \frac{W_A}{W} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n S_i t_i}, \quad (5)$$

де  $S_i$  – повна потужність,  $S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$ .

При роботі електроприводу зі сталим ГН формула для коефіцієнта потужності має вигляд

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (6)$$

Номінальна потужність на валу визначається за формулою

$$P_{\text{H}} = \sqrt{3}U_{\text{H}}I_{\text{H}} \cos \varphi_{\text{H}} \eta_{\text{H}}. \quad (7)$$

Потужність на валу  $P$  можна також визначити таким способом:

$$P = M\omega. \quad (8)$$

Номінальній потужності на валу  $P_{\text{H}}$  відповідає номінальний момент  $M_{\text{H}}$  і номінальна кутова швидкість  $\omega_{\text{H}}$ .

Для аналізу процесів у АД зазвичай використовують схеми заміщення, побудовані для однієї фази [1, 2, 6]. Математичну модель АД представимо Г-подібною схемою заміщення (рис. 1).

У цій схемі:  $R_2, R_2'$  – активні опори фаз статора і ротора відповідно;  $X_1 = 2\pi f_1 L_1, X_2' = 2\pi f_1 L_2'$  – індуктивні опори фаз статора і ротора відповідно;  $X_K = X_1 + X_2'$  – індуктивний опір короткого замикання;  $X_{\mu}$  – індуктивний опір контуру намагнічування;  $I_1, I_2', I_{\mu}$  – відповідно струм статора, приведений струм ротора і струм намагнічування;  $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  – ковзання АД.

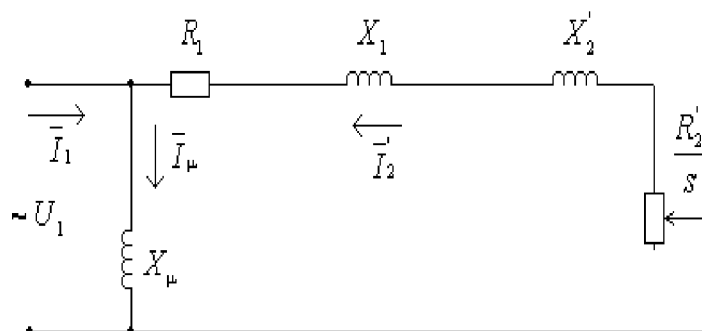


Рис. 1. Г-подібна схема заміщення АД

Для розрахунку струму намагнічування  $I_\mu$  і приведеного номінального струму ротора  $I_2'$  АД можуть бути використані наближені формули [2, 8]:

$$I_\mu = I_H \left( \sin \varphi_H - \frac{s_H \cos \varphi_H}{s_K} \right) = I_H \left( \sin \varphi_H - \cos \varphi_H / (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \right); \quad (9)$$

$$I_{2H}' = I_H \cos \varphi_H \sqrt{2\lambda / (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})}. \quad (10)$$

Момент двигуна можна визначити за спрощеною формулою Клосса

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (11)$$

де  $M_K$ ,  $s_K$  – критичні значення моменту та ковзання відповідно.

Процес енерговикористання споживаної енергії характеризується втратами потужності та ККД [6, 7]. Втрати потужності  $\Delta P$  в електродвигуні у сталому режимі при живленні від мережі зазвичай зображують як суму складових – незмінних  $K$ , змінних  $V$  та доданих (паразитних)  $\Delta P_D$  втрат на вихрові струми

$$\Delta P = K + V + \Delta P_D. \quad (12)$$

Під незмінними втратами  $K$  маються на увазі втрати потужності, які не залежать від навантаження двигуна. Це втрати в магнітопроводі (сталі) статора  $K_{C1}$  і ротора  $K_{C2}$ , механічні (від тертя в підшипниках) і вентиляційні –  $K_M$ , а також втрати на збудження  $K_3$  у міді обмотки статора

$$K = K_{C1} + K_{C2} + K_M + K_3. \quad (13)$$

В АД немає спеціальної обмотки збудження, призначеної для створення магнітного потоку. Потік двигуна створюється реактивною складовою струму статора  $I_\mu$ , яка називається струмом намагнічування. Втрати АД від струму намагнічування становлять

$$K_3 = 3I_\mu^2 R_1. \quad (14)$$

До змінних відносять втрати, які мають місце в обмотках двигунів під час протікання через них струмів, обумовлених навантаженням. Змінні втрати потужності у двигуні можуть бути в загальному випадку визначені через електричні або механічні параметри.

Для трифазних АД повні змінні втрати складаються з втрат у статорі і роторі

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'. \quad (15)$$

Виразимо повні змінні втрати таким чином:

$$V = 3I_2'^2 (R_2' + R_1 / \sigma^2) = V_2 (1 + \frac{R_1}{R_2' \sigma^2}), \quad (16)$$

де  $\sigma = I_2' / I_1$ .

У відповідності до схеми заміщення (через резистор  $R_1$  протікає струм  $I_2'$ ) змінні втрати в статорі становлять

$$V = 3I_2'^2 R_1 = V_2 R_1 / R_2', \quad (17)$$

а повні змінні втрати

$$V = 3I_2'^2 (R_1 + R_2') = V_2 (1 + R_1 / R_2'). \quad (18)$$

Змінні втрати потужності, що мають місце в роторі АД, можуть бути також визначені як різниця електромагнітної потужності і потужності на валу:

$$V = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = M\omega_0 s. \quad (19)$$

Змінні втрати в статорі АД становлять

$$V = \frac{M\omega_0 s R_1}{R_2'}, \quad (20)$$

а повні змінні втрати

$$V = M\omega_0 s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (21)$$

Втрати потужності при роботі двигуна в номінальному режимі визначаються за паспортними даними двигуна з урахуванням номінального КПД і номінальної потужності двигуна  $P_H$

$$\Delta P_H = P_H \frac{(1 - \eta_H)}{\eta_H} \quad (22)$$

або як різниця між споживаною електричною потужністю і номінальною потужністю на валу  $P_H$ :

$$\Delta P_H = P_{1H} - P_H. \quad (23)$$

Незмінні втрати потужності визначаються за формулою

$$K = \Delta P_H - V_H - \Delta P_{дн}, \quad (24)$$

де  $V_H$ ,  $\Delta P_{дн}$  – змінні та додані втрати у двигуні в номінальному режимі.

Робота в умовах, які відрізняються від нормальних, спричиняє споживання додаткової потужності. Якщо навантаження відмінне від номінального, то повні змінні втрати

$$V = V_H k'_{3I}{}^2, \quad (25)$$

де  $V = 3I_{2H}'^2 (R_2' + R_1 / \sigma_H^2)$  – повні змінні номінальні втрати;  $k'_{3I} = \frac{I_2'}{I_{2H}'}$  – коефіцієнт завантаження за струмом  $I_2'$ .

Додані (паразитні) втрати визначаються втратами на гістерезис і вихрові струми в режимі холостого ходу та під навантаженням. Вони залежать від навантаження, і їх можна визначити таким чином:

$$\Delta P_{д} = \Delta P_{дн} k'_{3I}{}^2, \quad (26)$$

де  $\Delta P_{дн} = 0,005P_H$  – додані втрати в номінальному режимі (згідно з ГОСТ-11828).

Повні втрати потужності в АД

$$\Delta P = K + V_H k'_{3I}{}^2 + \Delta P_{дн} k'_{3I}{}^2 = (V_H + \Delta P_{дн}) (a + k'_{3I}{}^2), \quad (27)$$

де  $a = \frac{K}{V_H + \Delta P_{дн}}$  – коефіцієнт втрат.

Активна та реактивна потужності для трифазного АД можуть бути розраховані за формулами

$$\Delta P = P_{МЕХ} + \Delta P = M\omega + K + V_1 + V_2 + \Delta P_{д}; \quad (28)$$

$$Q = 3I_{\mu}^2 X_{\mu} + 3I_1^2 X_1 + 3I_2'^2 X_2'. \quad (29)$$

Для Г-подібної схеми заміщення двигуна при  $R_{\mu} \approx 0$ ,  $I_{\mu} = U_{\phi} / X_{\mu}$  можна знайти реактивну потужність

$$Q = 3U_{\phi} I_{\mu} + 3I_2'^2 X_K, \quad (30)$$

де  $U_{\phi}$  – напруга живлення двигуна.

Оскільки  $3I_2'^2 X_K = M\omega_0 s X_K / R_2'$ , то можна записати:

$$Q = 3U_{\phi} I_{\mu} + M\omega_0 s X_K / R_2'. \quad (31)$$

За запропонованою моделлю розроблений алгоритм розрахунку параметрів АД (рис. 2).

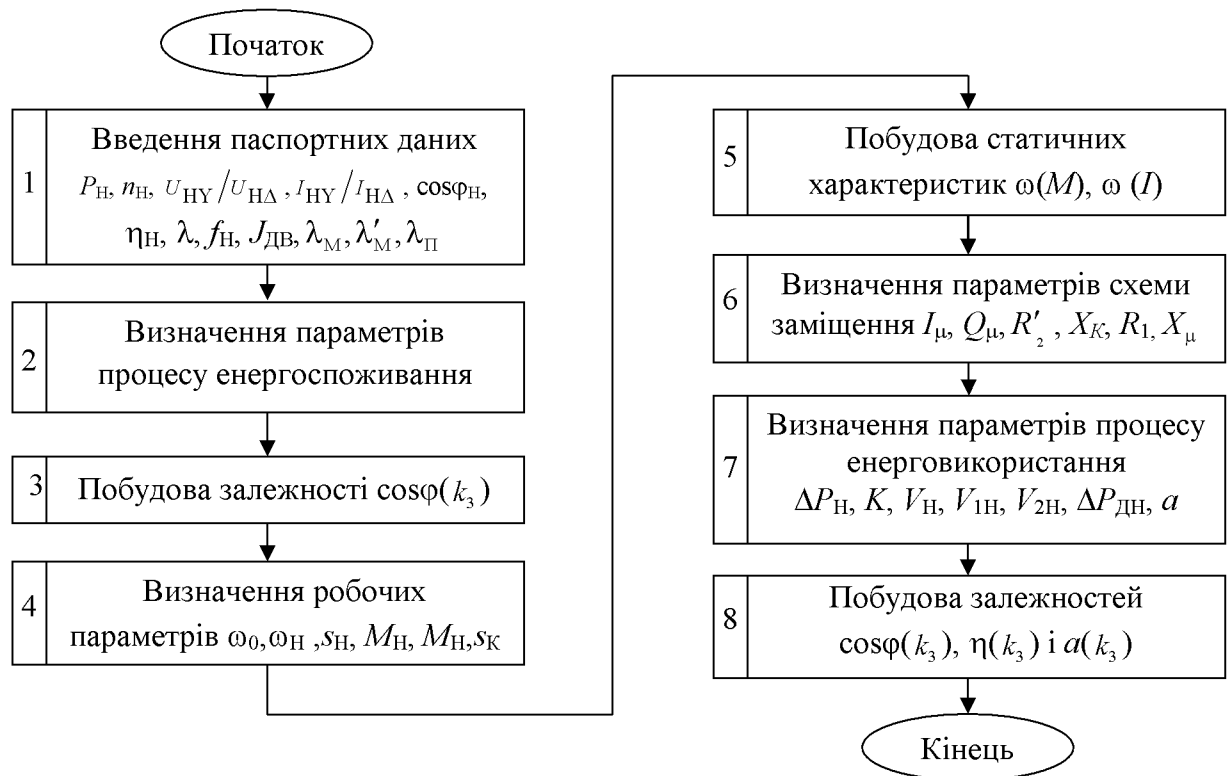


Рис. 2. Алгоритм розрахунку параметрів АД

За допомогою ЕОМ, використовуючи запропоновану методику, побудуємо в середовищі MATLAB робочі характеристики АД серії 5А в залежності від номінальної потужності та коефіцієнта завантаження за потужністю.

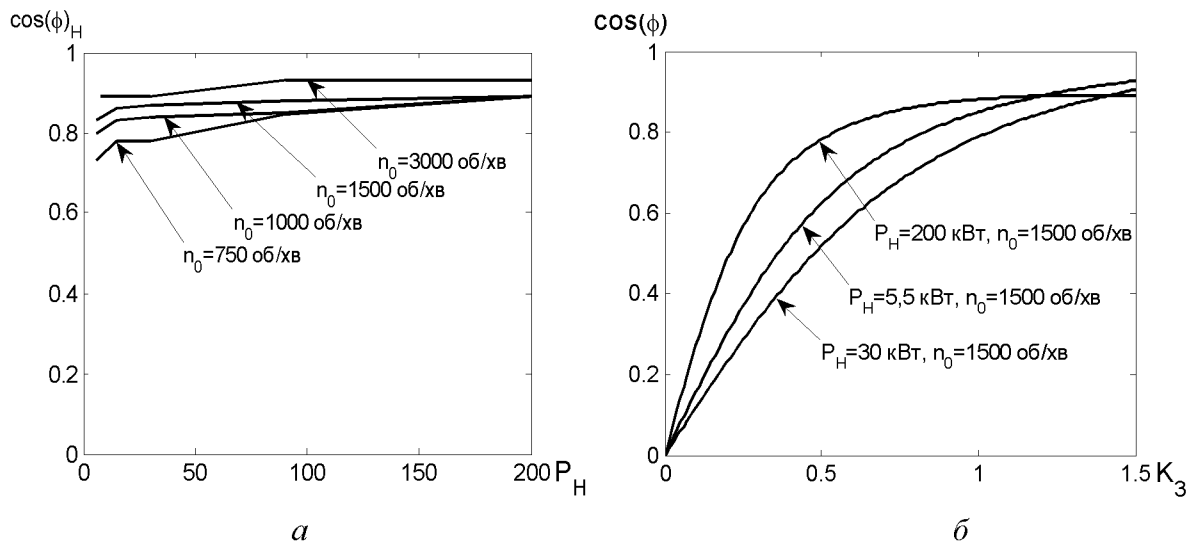


Рис. 3. Залежності номінального коефіцієнта потужності АД серії 5А від номінальної потужності (а) і коефіцієнта потужності від коефіцієнта завантаження двигуна (б)

На рис. 3, а наведені залежності номінального коефіцієнта потужності для АД від номінальної потужності  $P_n$  для різних частот обертання  $n_0$ . Характерним є вище значення  $\cos\varphi_H$  для двигунів більших номінальних потужностей і швидкостей обертання.

Залежність  $\cos\varphi$  від коефіцієнта завантаження  $k_3$  за потужністю АД для різних рівнів номінальної потужності наведено на рис. 3, б. Коефіцієнт потужності АД істотно залежить від його навантаження. При холостому ході коефіцієнт потужності невеликий, оскільки частка реактивної потужності є значною порівняно з активною потужністю. У міру збільшення навантаження зростає й  $\cos\varphi$ , досягаючи свого максимального значення в області номінального навантаження двигуна.

На рис. 4, а зображено залежності номінального ККД АД від номінальної потужності  $P_H$  та різних частот обертання  $n_0$ . Зі зростанням номінальної потужності номінальний ККД збільшується, що пояснюється зменшенням втрат потужності відносно корисної потужності двигуна. На рис. 4, б показані типові залежності ККД двигунів від коефіцієнта завантаження  $P_H$  для трьох значень номінальної потужності, розраховані за моделлю – суцільні лінії, та за експериментальними даними виробника – переривчасті. При незначних навантаженнях ККД двигуна невеликий. У міру збільшення навантаження він зростає, досягаючи максимального значення при потужності, яка дорівнює приблизно 0,7...0,8 номінальної.

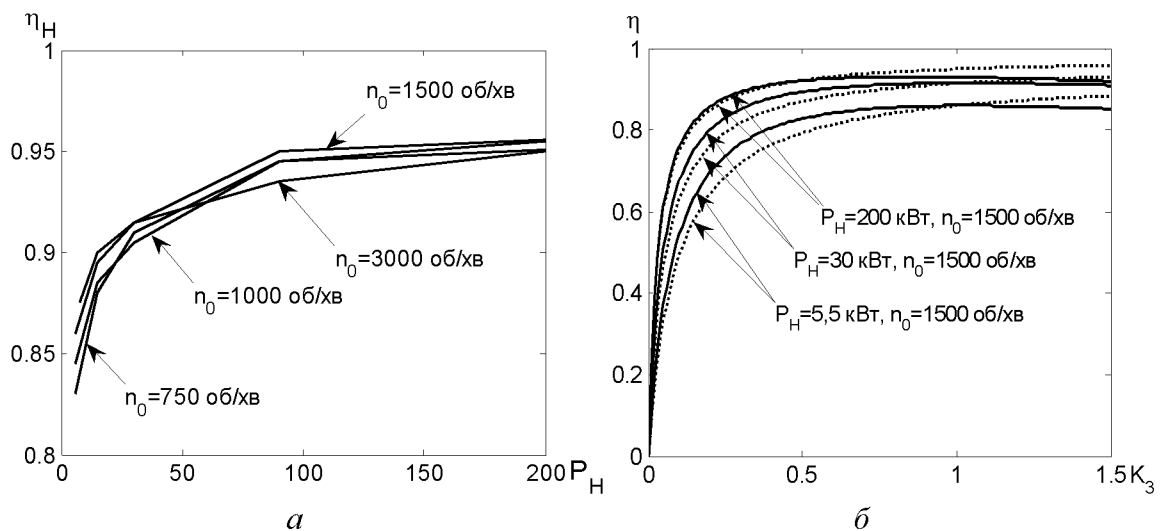


Рис. 4. Залежності номінального ККД АД серії 5А від номінальної потужності та різних частот обертання  $n_0$  (а) і ККД від коефіцієнта завантаження двигуна для трьох значень номінальної потужності (б)

### Висновки

Застосування запропонованої моделі формування і збереження еталонів у складі системи моніторингу АД дозволяє визначити за паспортними даними статичні характеристики, параметри процесу енергоспоживання та енерговикористання для номінального режиму, робочі параметри і параметри схеми заміщення.

Результати моделювання на ЕОМ в середовищі MATLAB залежностей ККД, коефіцієнта потужності і робочих параметрів АД промислової серії 5А показали достатньо високу збіжність результатів розрахунків і експериментальних даних, наданих виробниками.



Модель обчислень може застосовуватися для проведення порівняльної оцінки енергетичної ефективності різних типів асинхронного електроприводу і перевірки вибраного двигуна для конкретної технологічної установки.

1. *Браславский И. Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 202 с.
2. *Ильинский Н. Ф.* Электропривод: энерго - и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
3. *Карташев И. И.* Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
4. Технический каталог. Асинхронные электродвигатели. – М.: РУСЭЛПРОМ, 2008. – 116 с.
5. *Кравчик А. Э.* Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
6. *Закладний О. М.* Енергозбереження засобами промислового електроприводу: навч. посіб. / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
7. *Закладний О. М.* Електропривод: навч. посіб. / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний. – К.: Освіта України, 2009. – 351 с.
8. *Сыромятников И. А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.