

УДК 621.311.001.57(063)

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

О. М. Закладний, О. О. Закладний, Т. Ю. Оборонов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03057, Україна. E-mail: oboronovt@ukr.net

Наведено модель діагностування енергоефективності синхронного електропривода, що має ієрархічну структуру й складається з п'яти блоків. У першому визначаються первинні діагностичні ознаки двигуна, такі як частота, діюче значення напруги та струму, коефіцієнт завантаження; у другому – показники якості електроенергії: відхилення та несинусоїдальність напруги, відхилення частоти, у третьому визначаються параметри енергоспоживання: повна, активна, реактивна потужності, коефіцієнт потужності та потужність спотворень; у четвертому – параметри схеми заміщення; у п'ятому – параметри енерговикористання, тобто всі втрати потужності у двигуні й втрати енергії за час циклу, та будувється залежність коефіцієнта корисної дії від коефіцієнтів завантаження й потужності.

Ключові слова: енергоефективність, синхронний електропривод, діагностування, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А. Н. Закладной, О. А. Закладной, Т. Ю. Оборонов

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: oboronovt@ukr.net

Приведена модель диагностирования энергоэффективности синхронного электропривода, которая имеет иерархическую структуру и состоит из пяти блоков. В первом определяются первичные диагностические признаки двигателя, такие как частота, действующее значение напряжения и тока, коэффициент загрузки; во втором – показатели качества электроэнергии: отклонения и несинусоидальность напряжения, отклонения частоты; в третьем определяются параметры энергопотребления: полная, активная, реактивная мощности, коэффициент мощности и мощность искажений; в четвертом – параметры схемы замещения; в пятом – параметры энергопотребления, т.е. все потери мощности в двигателе, потери энергии за время цикла, и строится зависимость коэффициента полезного действия от коэффициентов загрузки и мощности.

Ключевые слова: энергоэффективность, синхронный электропривод, диагностирование, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Основними причинами низької енергоефективності електромеханічних систем із синхронними двигунами (СД) є відхилення від номінальних режимів експлуатації, неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про їх технічний стан, несвоєчасне виявлення й усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт. Робота електропривода у таких умовах призводить до значних втрат електроенергії, зниження ККД та коефіцієнта потужності.

Метою роботи є розроблення моделі діагностування енергоефективності синхронного електропривода шляхом контролювання у реальному часі його поточних експлуатаційних параметрів та діагностування й оцінювання енергетичного і технічного стану для виявлення неефективних режимів роботи та прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшої експлуатації.

МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Проблеми підвищення рівня енергоефективності та якості електроенергії мають особливу актуальність і є однією з найважливіших умов економічної та тривалої експлуатації електромеханічних систем. Пропонується діагностична модель для визначення енергетичної ефективності роботи синхронного електропривода (рис. 1). Модель ураховує якість напруги живлення.

Як первинні діагностичні ознаки приймаємо миттєві значення напруг $u(t)$ і струмів $i(t)$.

Для трифазної системи миттєві значення напруг $u(t)$ і струмів $i(t)$ визначаються наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= U_m \sin(\omega t) \\ u_B(t) &= U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_C(t) &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} i_A(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi_A) \\ i_B(t) &= I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_B\right) \\ i_C(t) &= I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_C\right) \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; $f = 50$ Гц – частота мережі.

Миттєві значення струму та напруги з урахуванням вищих гармонік:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + U_{1m} \sin(\alpha t + \psi_{u1}) + \\ &+ U_{2m} \sin(2\alpha t + \psi_{u2}) + U_{km} \sin(k\alpha t + \psi_{ku}); \end{aligned} \quad (3)$$

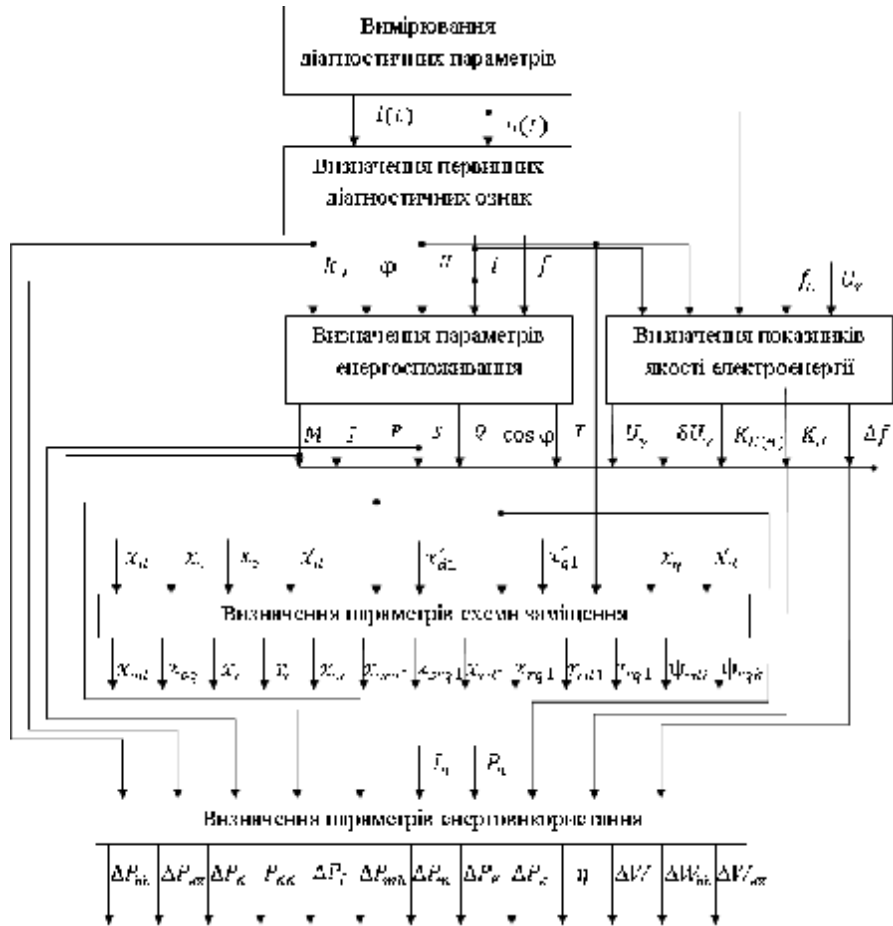


Рисунок 1 – Структурна схема моделі діагностування енергоефективності синхронного електропривода

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\alpha t + \psi_{i1}) + I_{2m} \sin(2\alpha t + \psi_{i2}) + I_{km} \sin(k\alpha t + \psi_{ki}), \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \approx 0,707 U_m; \quad (7)$$

де $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$ – стала складова або нульова гармоніка.

Напряга для k -ї гармоніки:

$$\left. \begin{aligned} u_{ak} &= U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \\ u_{bk} &= U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \frac{2\pi}{3}k) \\ u_{ck} &= U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k + \frac{2\pi}{3}k) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

де $U_m = \max(u(t))$; $I_m = \max(i(t))$ – амплітудні значення напруги й струму, відповідно.

Діючі значення напруги й струму з урахуванням вищих гармонік:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}; \quad (7)$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}. \quad (8)$$

Формуємо діагностичні ознаки.

Визначаємо частоту f .

Діючі значення (середньоквадратичні) напруги й струму:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}; \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}. \quad (6)$$

Діючі значення напруг U_A, U_B, U_C і струмів I_A, I_B, I_C для гармонічних коливань:

Середні значення діючих напруг і струмів АД:

$$\begin{aligned} U &= \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \\ I &= \frac{I_A + I_B + I_C}{3}, \end{aligned} \quad (9)$$

де U, I – міжфазні напруга й струм, відповідно.

Визначаємо коефіцієнт завантаження за струмом двигуна:

$$k_{3t} = \frac{t}{t_n}. \quad (10)$$

Визначаються показники якості електричної енергії (ГОСТ 13109–97).

Вимірюється усталене відхилення напруги δU_Y . Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, вимірюють діюче значення кожної міжфазної напруги основної частоти $U_{(1)i}$:

$$U_{(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left(\left(\sqrt{3} U_{ABi} + \sqrt{4 U_{BCi}^2 - \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2 + U_{ABi}^2}{U_{ABi}} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}} \right)^2 \right)} \quad (11)$$

де U_{ABi} , U_{BCi} , U_{CAi} – діючі значення міжфазних напруг основної частоти в i -ому спостереженні.

Для спрощення дозволяється визначати $U_{(1)i}$ за наближеним виразом

$$U_{(1)i} = \frac{1}{3} (U_{ABi} + U_{BCi} + U_{CAi}). \quad (12)$$

Обчислюють значення усередненої напруги U_Y як результат усереднення N спостережень напруг $U_{(1)i}$ за інтервал часу 1 хв за виразом:

$$U_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N D_i^2}{N}}, \quad (13)$$

де U_i – значення напруги $U_{(1)i}$ в i -ому спостереженні (число спостережень за 1 хв не більше 18).

Обчислюють значення усталеного відхилення напруги δU_Y у відсотках

$$\delta U_Y = \frac{U_Y - U_n}{U_n} 100, \quad (14)$$

де U_n – номінальна міжфазна напруга.

Несинусоїдальність напруги. Вимірювання коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{(n)i}$ здійснюють для міжфазних (фазних) напруг. Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, визначають діюче значення напруги n -ої гармоніки $U_{(n)i}$.

Вираховують значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)i}$ у відсотках як результат i -го спостереження за виразом:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} 100, \quad (15)$$

де $U_{(1)i}$ – діюче значення напруги основної частоти на i -ому спостереженні.

Допускається обчислювати даний показник за виразом:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_n} 100. \quad (16)$$

Вираховують значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$ у відсотках як результат усереднення N спостережень $K_{U(n)i}$ в інтервалі часу $T_{vs}=3$ с за виразом:

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}}, \quad (17)$$

де $N \geq 9$.

Вимірювання коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U здійснюють для міжфазних напруг. Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, визначають діючі значення гармонічних складових напруги в діапазоні гармонік від 2-ї до 40-ї. Обчислюють значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_{Ui} у відсотках як результат i -го спостереження:

$$K_{Ui} = \frac{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}{U_{(1)i}^2} 100, \quad (18)$$

де $U_{(1)i}$ – діюче значення міжфазної напруги основної частоти для i -го спостереження.

Допускається обчислювати цей показник за виразом:

$$K_{Ui} = \frac{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}{U_n^2} 100. \quad (19)$$

Вираховують значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{Ui} на інтервалі часу T_{vs} , що дорівнює 3 с, за рівнянням:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}, \quad (20)$$

де $N \geq 9$.

Вимірювання відхилень частоти Δf здійснюють наступним чином.

Для кожного i -го спостереження за призначений період часу вимірюють дійсне значення частоти f_i у герцах. Обчислюють усереднене значення частоти f_y у герцах як результат усереднення N спостережень f_i на інтервалі часу тривалістю 24 с за виразом:

$$f_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N f_i^2}{N}}, \quad (21)$$

де $N \geq 15$.

Вираховують значення відхилення частоти Δf у герцах:

$$\Delta f = f_y - f_n, \quad (22)$$

де f_n – номінальне значення частоти, Гц.

Визначаються діагностичні параметри енергоефективності – параметри процесу енергоспоживання.

Визначається кут зсуву φ у кожній фазі двигуна. При роботі електропривода в усталеному режимі з постійним або повільно змінюваним навантаженням середнє значення коефіцієнта потужності:

$$\cos \varphi = \frac{\cos \varphi_A + \cos \varphi_B + \cos \varphi_C}{3} = \frac{P}{S}. \quad (23)$$

Якщо електродвигун має циклічний графік електричних навантажень із різними навантаженнями, то він як споживач реактивної енергії характеризується середньозваженим або цикловим коефіцієнтом навантаження, який визначається відношенням використаної активної енергії за цикл W_a до повної енергії W_p відповідно до виразу:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{W_p} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n S_i t_i}. \quad (24)$$

Миттєва потужність, обумовлена добутком миттєвих напруг і струму на вході електромеханічного перетворювача, дорівнює швидкості надходження електромагнітної енергії в перетворювач у даний момент і змінюється протягом періоду змінного струму і за величиною, і за знаком. Якщо миттєва потужність позитивна, то енергія надходить у перетворювач, якщо негативна – повертається джерелу. Можливість повернення енергії джерелу обумовлена тим, що з електричним колом зв'язане електромагнітне поле, яке запасає її протягом однієї частини періоду змінного струму й повертає протягом іншої частини періоду.

Активна потужність (середнє за період значення миттєвої потужності)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt; \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} p_a &= u_a i_a = U_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= U I (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) \\ p_b &= u_b i_b = U_m I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) = \\ &= U I (\cos \varphi - \cos(2\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi)) \\ p_c &= u_c i_c = U_m I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi) = \\ &= U I (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi)) \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Активна потужність, що споживається складним колом, дорівнює сумі активних потужностей окремих елементів цього кола.

Потужності, що споживаються в кожній фазі двигуна:

– повна S

$$S_A = U_{fA} I_A; \quad S_B = U_{fB} I_B; \quad S_C = U_{fC} I_C; \quad (27)$$

– активна P

$$\left. \begin{aligned} P_A &= U_{fA} I_A \cos \varphi_A = S_A \cos \varphi_A \\ P_B &= U_{fB} I_B \cos \varphi_B = S_B \cos \varphi_B \\ P_C &= U_{fC} I_C \cos \varphi_C = S_C \cos \varphi_C \end{aligned} \right\}; \quad (28)$$

– реактивна Q

$$\left. \begin{aligned} Q_A &= U_{fA} I_A \sin \varphi_A = S_A \sin \varphi_A \\ Q_B &= U_{fB} I_B \sin \varphi_B = S_B \sin \varphi_B \\ Q_C &= U_{fC} I_C \sin \varphi_C = S_C \sin \varphi_C \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

Споживані повна S , активна P та реактивна Q потужності двигуна:

$$\left. \begin{aligned} S &= S_A + S_B + S_C = 3U_f I = \sqrt{3}UI \\ P &= P_A + P_B + P_C = 3U_f I \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi \\ Q &= Q_A + Q_B + Q_C = 3U_f I \sin \varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (30)$$

Потужність спотворень обумовлена протіканням гармонік струму, що не збігаються за частотою з напругою мережі. Середнє арифметичне миттєвої потужності, зв'язаної з цими гармоніками, за період також дорівнює нулю, однак і вони викликають додаткові втрати енергії в мережі.

Потужність спотворення (визначається перемноженням дійсних значень різнопорядкових гармонічних струму і напруги) кожної фази

$$\left. \begin{aligned} T_A &= \sqrt{S_A^2 - P_A^2 - Q_A^2} \\ T_B &= \sqrt{S_B^2 - P_B^2 - Q_B^2} \\ T_C &= \sqrt{S_C^2 - P_C^2 - Q_C^2} \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

Середня потужність спотворення двигуна:

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (32)$$

Вторинні діагностичні ознаки.

Визначення параметрів схеми заміщення для СД, що надана в осях d і q (рис. 2).

Реактивний опір взаємної індукції по осях d і q :

$$x_{ad} = x_d - x_s; \quad x_{aq} = x_q - x_s. \quad (33)$$

Активний та індуктивний опори контуру збудження:

$$x_r = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d}; \quad r_r = \frac{x_r}{\omega_s - T_r}; \quad (34)$$

$$x_{sr} = x_r - x_{ad} = x_{ad} \left(\frac{x_{ad}}{x_d - x'_d} - 1 \right). \quad (35)$$

Опір розсіювання демпферних контурів в осях d і q визначається на основі схем заміщення (рис. 2).

$$\left. \begin{aligned} x_{srd1} &= \frac{1}{\frac{1}{x'_{d1} - x_s} - \frac{1}{x_{ad}} - \frac{1}{x_{sr}}}; \\ x_{srq1} &= \frac{1}{\frac{1}{x'_{q1} - x_s} - \frac{1}{x_{aq}}}, \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

тоді індуктивні опори демпферних контурів

$$x_{rd1} = x_{ad} + x_{srd1}; \quad x_{rq1} = x_{aq} + x_{srq1}. \quad (37)$$

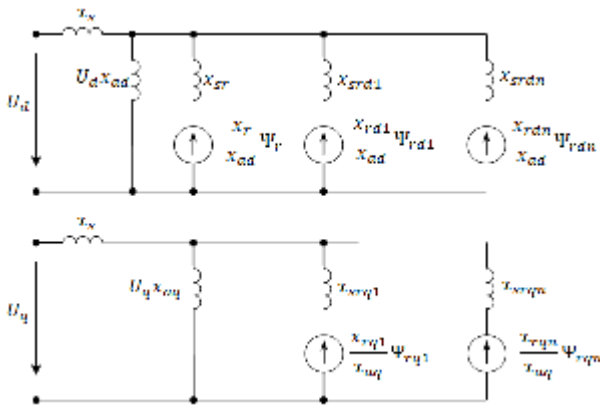


Рисунок 2 – Схема заміщення синхронного двигуна

Активні опори еквівалентних демпферних контурів оцінюються на основі перехідних параметрів двигуна за виразами:

$$r_{rd1} = \frac{(x_{rd1}x_d - x_{ad}^2)x_{d1}}{\omega_s x_d x'_{d1}}; \quad (38)$$

$$r_{rq1} = \frac{x_{rq1}x_q - x_{aq}^2}{\omega_s x_q T'_{q1}}.$$

Вираз для розрахунку r_{rd1} виконується, якщо виконується співвідношення $r_{rd1} \gg r_r$, що справедливо для потужних явнополюсних синхронних машин і може розглядатися як допущення для неявнополюсних синхронних машин у разі наближеного заміщення ротора двома еквівалентними демпферними контурами.

Активний опір статора:

$$r \approx \frac{x_2}{\omega_s T_a}. \quad (39)$$

Реактивний опір зворотної послідовності:

$$x_2 \approx \frac{2x'_{d1}x'_{q1}}{x'_{d1} + x'_{q1}}, \quad (40)$$

звідки можна виразити значення x'_{q1} .

Визначаємо початкові значення потокозчеплення обмотки збудження й потокозчеплення демпферних контурів за виразами:

$$\Psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q}; \quad \Psi_{rqk} = \frac{x_{aq}}{x_{rqk}} E_{\delta d}. \quad (41)$$

Визначення робочих параметрів і побудова статичних характеристик СД.

Корисний момент на валу лінійно залежить від P_2 :

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega}, \quad (42)$$

де $\Omega = 2\pi n = const$.

Момент холостого ходу:

$$M = \frac{\Delta P_{meh} + \Delta P_f + \Delta P_d}{\Omega}. \quad (43)$$

Електромагнітний момент:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{P_2 + \Delta P_{meh} + \Delta P_f + \Delta P_d}{\Omega}. \quad (44)$$

Повний струм визначається активною та реактивною складовими. Перша створює момент двигуна (активну потужність), друга – магнітний потік.

Електромагнітна потужність на валу СД:

$$P = M\omega. \quad (45)$$

Втрати потужності

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P = \Delta P_{hh} + \Delta P_{kz} + \Delta P_d + \Delta P_{dd}, \quad (46)$$

де ΔP_{hh} – постійні втрати потужності; ΔP_{kz} – змінні втрати; ΔP_d – додані (паразитні) втрати; ΔP_{dd} – додаткові втрати.

Додані (паразитні) втрати, що визначаються втратами на гістерезис і вихрові струми в режимі холостого ходу та під навантаженням, залежать від навантаження:

$$\Delta P_d = \Delta P_{dn} k_{zi}^2, \quad (47)$$

де $\Delta P_{dn} = 0,005\Delta P_n$ – додані втрати в номінальному режимі.

Додаткові втрати в обмотках і сердечниках двигуна обумовлені несиметрією ΔP_{nsm} та несинусоїдальністю ΔP_{ns} напруги живлення:

$$\Delta P_{dd} = \Delta P_{nsm} + \Delta P_{ns}. \quad (48)$$

Втрати потужності на збудження, Вт:

$$\Delta P_f = \frac{r_f I_f^2}{\eta_f} = \frac{U_f I_f}{\eta_f}, \quad (49)$$

де $r_f I_f^2$ – електрична потужність збудження генератора, Вт; I_f – струм збудження, А; U_f – напруга збудження, В; r_f – опір обмотки збудження, Ом; η_f – ККД збуджувача [4].

Механічні втрати потужності ΔP_{meh} складаються із втрат на вентиляцію машини і на тертя в підшипниках ротора і охолоджуючий газ, шітках і контактних кільцях. Механічні втрати в загальному вигляді залежать від частоти обертання ротора

$$\Delta P_{meh} = C_1 n^a, \quad (50)$$

де $b=2-3$ – сталий коефіцієнт, що визначається схемою вентиляції машини та іншими факторами; C_1 – сталий коефіцієнт.

У більшості синхронних машин додаткові втрати невеликі, і в розрахунках ККД часто приймають $\Delta P_d = 0$.

Електромагнітна потужність

$$P_{meh} = \Delta P_1 - \Delta P_f - \Delta P_{meh} - \Delta P_d. \quad (51)$$

Магнітні втрати потужності ΔP_m , що складаються з втрат на гістерезис (перемагнічування) ΔP_h і на вихрові струми ΔP_v :

$$\Delta P_m = \Delta P_v + \Delta P_h = C_2 f_1^{1.5}, \quad (52)$$

де C_2 – сталий коефіцієнт.

Електричні втрати потужності в обмотці якоря, Вт:

$$\Delta P_E = mrI^2, \quad (53)$$

де m – число фаз якоря; r – активний опір фази обмотки якоря, Ом; I – фазний струм якоря, А.

Втрати у живлячому кабелі ΔP_k залежать від опору проводу R_p і повного струму I_p :

$$\Delta P_k = 3I_p^2 R_p. \quad (54)$$

Повні або сумарні втрати потужності в машині:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_{meh} + \Delta P_d + \Delta P_m + \Delta P_E + \Delta P_k. \quad (55)$$

Постійні втрати або втрати холостого ходу:

$$\Delta P_{hh} = \Delta P_f + \Delta P_{meh} + \Delta P_m. \quad (56)$$

Коефіцієнт завантаження синхронного двигуна:

$$k_z = \frac{P_2}{P_{2n}} = \frac{I}{I_n}. \quad (57)$$

Змінні втрати або втрати короткого замикання:

$$\Delta P_{kz} = mrk_z^2 I_n^2 = k_z^2 \Delta P_{kn}. \quad (58)$$

Залежність ККД від коефіцієнтів завантаження k_z (рис. 4) і потужності $\cos \varphi$:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{hh} + k_z^2 \Delta P_{kn}}{k_z S_n \cos \varphi + \Delta P_{hh} + k_z^2 \Delta P_{kn}}. \quad (59)$$

Коефіцієнт погіршення потужності через несиметрію напруги, у відносних одиницях

$$k_p = \frac{100 - k_{2U}^2}{100}. \quad (60)$$

Постійні втрати потужності не залежать від навантаження і містять у собі втрати: у сталі статора і ротора ΔP_{st} ; механічні від тертя в підшипниках і вентиляційні $\Delta P_{meh} = 0,01 \Delta P_n$; збудження – у міді обмотки статора від протікання струму намагнічування I_μ (в АД немає спеціальної обмотки збудження, призначеної для створення магнітного потоку, потік створюється реактивною складовою струму статора I_μ).

Коефіцієнт погіршення потужності

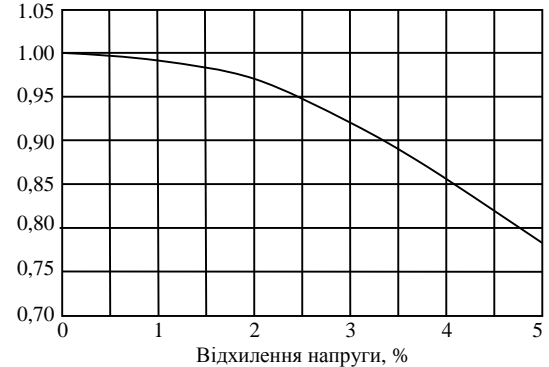


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта погіршення потужності від відхилення напруги

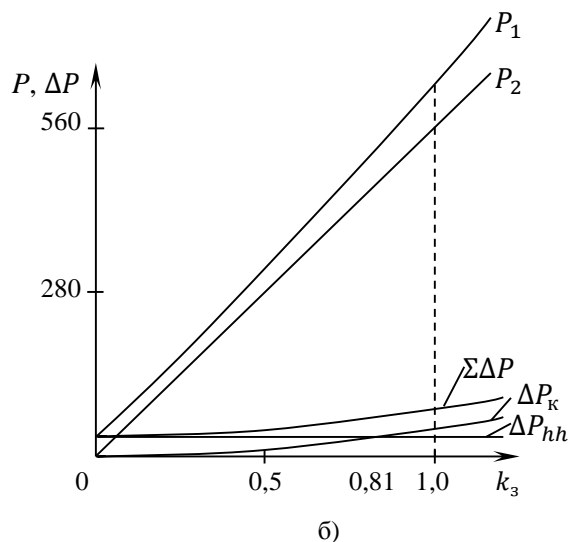
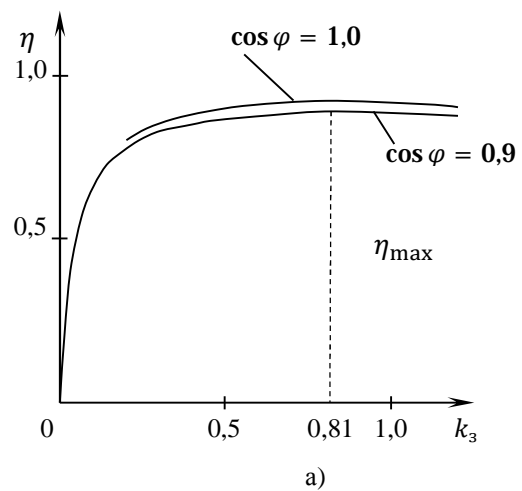


Рисунок 4 – Залежність ККД (а), потужності та втрат (б) СД від завантаження при $\cos \varphi = \text{const}$

Номинальна потужність з урахуванням несиметрії напруги:

$$P'_n = P_n k_p. \quad (61)$$

Коефіцієнт завантаження АД за потужністю:

$$k_{zp} = \frac{P}{P'_n} = \frac{P}{P_n k_p}. \quad (62)$$

Втрати енергії за час циклу T_{ts} зможуть бути визначені за допомогою наступного виразу:

$$\Delta W = \int_0^{T_{ts}} \Delta P dt = \int_0^{T_{ts}} \Delta P_{hh} dt + \int_0^{T_{ts}} \Delta P_{kz} dt = \Delta W_{hh} + \Delta W_{kz}, \quad (63)$$

де ΔW_{hh} , ΔW_{kz} – втрати енергії, обумовлені, відповідно, постійними і змінними втратами потужності.

При роботі двигуна з циклічним навантаженням втрати енергії

$$\Delta W = \int_0^{T_{ts}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i, \quad (64)$$

де ΔP_i , t_i – втрати потужності і час роботи при навантаженні; n – число значень навантаження на окремих ділянках; $\sum_{i=1}^n t_i = T_{ts}$ – час циклу.

Енергія споживання з мережі за час циклу виробничого механізму:

$$\Delta W = \int_0^{T_{ts}} \Delta P(t) dt. \quad (65)$$

ВИСНОВКИ. Застосування запропонованої моделі дозволяє визначити параметри процесу енергоспоживання та енерговикористання для номінального режиму, робочі параметри і параметри схеми заміщення.

Запропоновано рішення, яке полягає в контролюванні у реальному часі енергоефективності синх-

ронного електропривода. Математичний апарат діагностування поєднує методи аналізування миттєвих значень струмів і напруг електропривода й дозволяє визначати енергетичний стан електропривода. Відносна похибка розрахунку параметрів і характеристик СД за методикою діагностування не перевищує 7%, що цілком достатньо для інженерної практики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Праховник А.В., Закладний О.М., Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2011. – № 1. – С. 66–72.
2. Мелешкина Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем: монография, книга 1. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
4. Закладний О.М., Закладний О.О., Оборнов Т.Ю. Методика розрахунків робочих параметрів синхронного двигуна за паспортними даними // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2012. – № 2. – С. 14–19.

DIAGNOSTICS OF ENERGY EFFICIENCY OF SYNCHRONOUS DRIVE

A. Zakladnyi, O. Zakladnyi, T. Oboronov

National Technical University of Ukraine “KPI”

prosp. Peremohi, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: oboronovt@ukr.net

The article presents a model of diagnosing synchronous electric energy which has a hierarchical structure and consists of five blocks. The first determined the primary engine diagnostic features such as frequency, rms voltage and current load factor. The second determined power quality indices: diversion and nonsinusoidal voltage, frequency deviation. In the third defined energy parameters: full, active, reactive power, power factor and power distortion. In the fourth equivalent circuit parameters are determined. In the fifth energy parameters are defined, all the engine power loss and the loss of energy during the cycle and based dependence of the efficiency of the load factor and power.

Key words: energy efficiency, the synchronous drive, diagnostics, efficiency factor, power factor.

REFERENCES

1. Prakhovnik, A.V, Zakladnyi, O.M. and Zakladnyi, O.O. (2011), “Functional diagnostic efficiency of electromechanical systems with asynchronous motors”, *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, no. 1, pp. 66–72. (in Ukrainian)
2. Meleshkina, G.A. and Merkuriev, G.V. (2006), *Ustoychivost energosistem* [Stability energosistem], NOU «Tsentр podgotovki kadrov energetiki», St. Petersburg, Russia. (in Russian)
3. Syromyatnikov, I.A. (1984), *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelej* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors], Energoatomizdat, Moscow, Russia. (in Russian)
4. Zakladnyi, O.M., Zakladnyi, O.O. and Oboronov, T.Yu. (2012), “Methods of payment synchronous motor operating parameters on passport data”, *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, no. 2, pp. 14–19. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 10.05.2013.