

МЕТОДИКА ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

У статті наведено методику функціонального діагностування енергоефективності, процесів енергоспоживання й енерговикористання асинхронного електропривода, а також результати аналітичної перевірки методики для асинхронних двигунів нової промислової серії 5А.

Ключові слова: енергоефективність, асинхронний двигун, діагностування, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності.

Вступ. Одним з актуальних завдань енергозбереження є підвищення ефективності енерговикористання. Значні резерви економії енергії мають електромеханічні системи з асинхронним електроприводом (АЕП), оскільки оснащені ним машини і установки є одними з найбільш енергоємних споживачів електроенергії (вони споживають понад 60% виробленої у світі електроенергії).

Однією з перешкод широкому впровадженню енергозбереження в життя є те, що управління раціональним використанням енергії не поширюється на конкретного технологічного споживача – АЕП. Енергоефективність його оцінюється аперіодично, наприклад, під час проведення енергетичного аудиту. Перспективним підходом методології енергоменеджменту є впровадження постійно діючого моніторингу та діагностування енергоефективності й технічного стану АЕП для оперативного реагування на погіршення його стану і порушення технологічного режиму [1].

Аналіз попередніх досліджень. Одним з механізмів втілення енергозбереження в життя є енергетичний менеджмент. Дотепер в енергетичному менеджменті деталізоване управління раціональним використанням енергії не поширювалося на конкретного технологічного споживача, його режими роботи. В першу чергу розглядалось підприємство в цілому або певна технологічна лінія. Контроль конкретного обладнання, наприклад, АЕП, не був постійним і безперервним та відбувався за фактом, а не в реальному часі, коли неефективне споживання електроенергії мало місце значний проміжок часу.

Останнім часом енергетичний менеджмент набуває нових рис, а саме, – він став поширюватися на кінцевого споживача [2]. Це є новим стандартом у методології енергетичного менеджменту – запроваджуються високий ступінь деталізації, моніторинг та діагностування енергоефективності й технічного стану АЕП і, відповідно, – оперативне реагування на їх погіршення.

Найближчими за функціональною побудовою до систем моніторингу та діагностування є електронні системи обліку електричної енергії та системи вимірювання якості електроенергії на основі промислових засобів автоматизації. Однак, володіючи розвиненими функціями вимірювання та оброблення даних, вони, з одного боку, не забезпечують аналізування отриманої інформації про енергетичні процеси, а з іншого – зовсім не призначені для діагностування АЕП, оскільки не мають функцій математичного моделювання.

Метою роботи є розроблення методики функціонального діагностування енергоефективності АЕП, яка за рахунок контролювання у реальному часі його поточних експлуатаційних параметрів дозволяє визначити неефективні режими роботи та прийняти обґрунтовані рішення щодо подальшої експлуатації.

Матеріали і результати досліджень. Розроблена модель функціонального діагностування енергоефективності АЕП має ієрархічну структуру і складається з моделей більш низького рівня: моделі асинхронного двигуна (АД); ЕЕМ - моделі формування і збереження еталонів [3]; ЕДМ - моделі діагностування параметрів процесів перетворення електроенергії. ЕДМ складається з моделі визначення параметрів процесу енергоспоживання, моделі визначення параметрів схеми заміщення та моделі визначення параметрів процесу енерговикористання енергії, що споживається.

На основі моделей розроблено методику функціонального діагностування енергоефективності АЕП, яка полягає в наступному.

1. Визначення діагностичних параметрів

Миттєві значення напруг $u(t)$, струму $i(t)$ та температури навколишнього середовища. Вимірюються кут зсуву φ в кожній фазі двигуна і частота мережі живлення f .

2. Визначення первинних діагностичних ознак

Діюче значення напруги і струму кожної фази

$$U_j = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_j^2(t) dt}, \quad I_j = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_j^2(t) dt}, \quad j \in \Omega_1, \quad \Omega_1 = \{A; B; C\}.$$

Активна потужність в кожній фазі двигуна $P_j = \frac{1}{T} \int_0^T u_j(t) i_j(t) dt, j \in \Omega_1$.

Середні значення діючих напруг і струмів АД

$$I = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} I_j; U_{\Phi} = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} U_j;$$

$$U = \frac{1}{3} \sum_{i \in \Omega_2} U_i, i \in \Omega_2, \Omega_2 = \{AB; BC; CA\}.$$

3. Визначення параметрів процесу енергоспоживання

Середнє значення коефіцієнта потужності $\cos\varphi = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} \cos\varphi_j = \frac{P}{S}$.

Споживана повна потужність двигуна

$$S = \sum_{j \in \Omega_1} S_j = 3U_{\Phi} I = \sqrt{3} U I; S_j = U_{\Phi j} I_j, j \in \Omega_1.$$

Споживані активна P та реактивна Q потужності двигуна

$$P_1 = \sum_{j \in \Omega_1} P_j = 3U_{\Phi} I \cos\varphi = \sqrt{3} U I \cos\varphi;$$

$$P_j = U_{\Phi j} I_j \cos\varphi_j = S_j \cos\varphi_j;$$

$$Q = \sum_{j \in \Omega_1} Q_j = 3U_{\Phi} I \sin\varphi = \sqrt{3} U I \sin\varphi;$$

$$Q_j = U_{\Phi j} I_j \sin\varphi_j = S_j \sin\varphi_j, j \in \Omega_1.$$

Потужність спотворення двигуна

$$T = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q^2};$$

$$T_j = \sqrt{S_j^2 - P_j^2 - Q_j^2}, j \in \Omega_1.$$

4. Визначення показників якості електричної енергії

Діюче значення напруги n-ої гармоніки (перетворення Фур'є)

$$U_{(n)i} = \sqrt{\left(\frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n\omega t) dt\right)^2 + \left(\frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n\omega t) dt\right)^2};$$

$$U_{(0)i} = \int_0^T u(t) dt.$$

Напруги зворотної та нульової послідовностей

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B e^{-j120} + \underline{U}_C e^{j120}}{3};$$

$$3\underline{U}_0 = \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C.$$

Усталене відхилення напруги

$$U_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_{1(i)}^2}{N}}; \delta U_Y = \frac{U_Y - U_n}{U_n} \cdot 100.$$

Коефіцієнти n-их гармонічних складової напруги та коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{1(i)}} \cdot 100; K_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100.$$

Коефіцієнт несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100; K_{0U} = \frac{\sqrt{3} U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100.$$

Відхилення частоти $\Delta f = f_y - f_n$.

5. Визначення параметрів схеми заміщення

Схема заміщення АД для струмів прямої та зворотної послідовностей наведено на рис. 1.

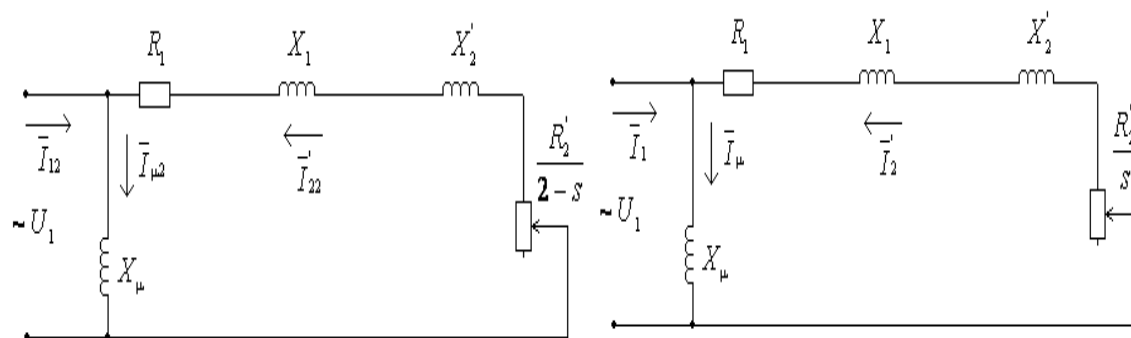


Рис. 1 Схеми заміщення АД для струмів прямої та зворотної послідовностей

Струми зворотної і нульової послідовностей

$$I_2 = \frac{I_A + I_B e^{-j120^\circ} + I_C e^{j120^\circ}}{3}; \quad 3I_0 = I_A + I_B + I_C.$$

Приведений струм ротора

$$I'_2 = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} I'_{2j} = I \cos \varphi \sqrt{\frac{2\lambda_1}{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 - 1}}}; \quad I'_{2j} = I_j \cos \varphi_j \sqrt{\frac{2\lambda_1}{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 - 1}}}, \quad j \in \Omega_1;$$

$$\lambda_1 = \lambda \frac{c_U^2}{c_f^2}; \quad c_U = \frac{U}{U_H}; \quad c_f = \frac{f}{f_H}.$$

Загальний опір фаз статора з векторної діаграми

$$Z = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} Z_j = \frac{U_\Phi}{I_2}; \quad Z_j = \frac{U_{\Phi j}}{I_{2j}}, \quad j \in \Omega_1.$$

Сумарний активний опір обмоток двигуна

$$R_S = R_1 + \frac{R'_2}{s}; \quad R_{Sj} = R_{1j} + \frac{R'_{2j}}{s}, \quad j \in \Omega_1.$$

Індуктивні опори короткого замикання фаз статора

$$X_K = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} X_{Kj} = \sqrt{Z^2 - R_S^2}; \quad X_{Kj} = \sqrt{Z_j^2 - R_{Sj}^2}, \quad j \in \Omega_1.$$

Ковзання двигуна $s = \frac{I_2 s_H}{I_{2H} c_U^2}$.

Активний опір фаз статора двигуна

$$R_1 = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} R_{1j} = \left(\left(c_1 3U_{\Phi}^2 / 2\omega'_0 M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \right)^2 - X_K^2 \right) / 2 \left(c_1 3U_{\Phi}^2 / 2\omega'_0 M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \right);$$

$$R_{1j} = \left(\left(c_1 3U_{\Phi j}^2 / 2\omega'_0 M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \right)^2 - X_{Kj}^2 \right) / 2 \left(c_1 3U_{\Phi j}^2 / 2\omega'_0 M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \right), \quad j \in \Omega_1.$$

Приведений активний опір фаз ротора

$$R'_2 = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} R'_{2j} = s(R_S - R_1); \quad R'_{2j} = s(R_{Sj} - R_{1j}), \quad j \in \Omega_1.$$

Струм намагнічування кожної фази

$$I_\mu = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} I_{\mu j} = I \left(\sin \varphi - s \cos \varphi / s_{k_f} \right);$$

$$I_{\mu j} = I_j \left(\sin \varphi_j - s \cos \varphi_j / s_{k_f} \right), \quad j \in \Omega_1.$$

Індуктивний опір кола намагнічування фаз

$$X_\mu = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} X_{\mu j} = \frac{U_\Phi}{I_\mu}; \quad X_{\mu j} = \frac{U_{\Phi j}}{I_{\mu j}}, \quad j \in \Omega_1.$$

6. Визначення робочих параметрів і побудова статичних характеристик.

Моменти двигуна від струмів прямої та зворотної послідовності

$$M_1 = \frac{2M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \left(1 + \frac{R_1 s_K}{R_2 k_f} \right)}{\frac{s_K}{c_f s} + \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}}; \quad M_2 = \frac{2M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \left(1 + \frac{R_1 s_K}{R_2 k_f} \right)}{\frac{s_K}{c_f (2-s)} + \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}};$$

$$\Delta M = \left(-0.144 \left(\frac{M_1}{M_K} \right)^2 + 0.12 \left(\frac{M_1}{M_K} \right) + 0.002 \right) M_K.$$

Загальний обертальний момент АД

$$M = M_1 + M_2.$$

Частота обертання АД з урахуванням відхилення частоти мережі від номінальних параметрів $\omega = c_f \omega_0 (1 - s)$.

7. Визначення параметрів процесу енерговикористання споживаної енергії

Електромагнітна потужність на валу АД

$$P = M \omega.$$

Втрати потужності

$$\Delta P_\Sigma = P_1 - P = K + V + \Delta P_1 + \Delta P_2.$$

Змінні втрати в обмотках визначаються струмом навантаження

$$V = V_H k_{3I}^2; \quad V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R'_2.$$

Додані (паразитні) втрати

$$\Delta P_1 = \Delta P_{1H} k_{3I}^2.$$

Додаткові втрати від несиметрії напруги

$$\Delta P_{НСМ} = M_2 \omega.$$

Додаткові втрати від несинусоїдальності напруги

$$\Delta P_{НС} = 2 k_{II}^2 V_{1H} \sum_{v=n}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}.$$

Додаткові втрати потужності

$$\Delta P_2 = \Delta P_{НС} + \Delta P_{НСМ}.$$

ККД електромеханічного перетворювача

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P_{\Sigma}}; \eta = \frac{\int_0^{T_u} P dt}{\int_0^{T_u} P dt + \int_0^{T_u} \Delta P_{\Sigma} dt}.$$

Втрати енергії за час циклу T_u

$$\Delta W = \int_0^{T_u} \Delta P_{\Sigma}(t) dt = \int_0^{T_u} K(t) dt + \int_0^{T_u} V(t) dt + \int_0^{T_u} \Delta P(t)_1 dt + \int_0^{T_u} \Delta P_2(t) dt = \Delta W_K + \Delta W_V + \Delta W_{\Delta P_1} + \Delta W_{\Delta P_2}.$$

Втрати енергії у разі роботи двигуна з циклічним навантаженням

$$\Delta W = \int_0^{T_u} \Delta P_{\Sigma}(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_{\Sigma i} t_i.$$

Експериментальний метод перевірки розробленої методики функціонального діагностування АЕП трудомісткий і потребує проведення стендових випробувань короткого замикання, холостого ходу тощо для визначення параметрів схеми заміщення, а також великої кількості додаткових розрахунків. До того ж він не гарантує необхідної достовірності результатів і має значну похибку (10–15%).

Аналітична перевірка методики функціонального діагностування АЕП ставить за мету встановлення її адекватності паспортним даним двигуна (експериментальним даним виробника), які характеризують його номінальний режим роботи.

Перевірку методики здійснимо для АД серії 5А основного виконання, типу 5АМХ132S4. Ця серія характеризується стабільними параметрами двигунів. У розрахунках прийнято, що двигун живиться номінальною напругою стандартної частоти. Результати перевірки наведено в табл. 1 та на рис. 2 - результати розрахунків залежностей ККД та коефіцієнту потужності від завантаження.

Таблиця 1. Результати розрахунків залежностей ККД та коефіцієнта потужності від завантаження

		K_3	0,5	0,75	1,0	1,25
ККД	Паспортні дані		87,0	88,0	87,5	86,5
	ЕЕМ	Значення	86,6	87,5	87,48	86,8
		Похибка, %	0,46	0,62	0,02	- 0,32
	ЕДМ	Значення	85,0	87,1	87,5	87,1
		Похибка, %	2,30	1,02	0,00	- 0,69
	cosφ	Паспортні дані		0,73	0,81	0,85
ЕЕМ		Значення	0,70	0,80	0,8504	0,88
		Похибка, %	4,10	1,73	0,05	- 2,32
ЕДМ		Значення	0,69	0,79	0,85	0,89
		Похибка, %	5,48	2,47	0,00	- 3,49

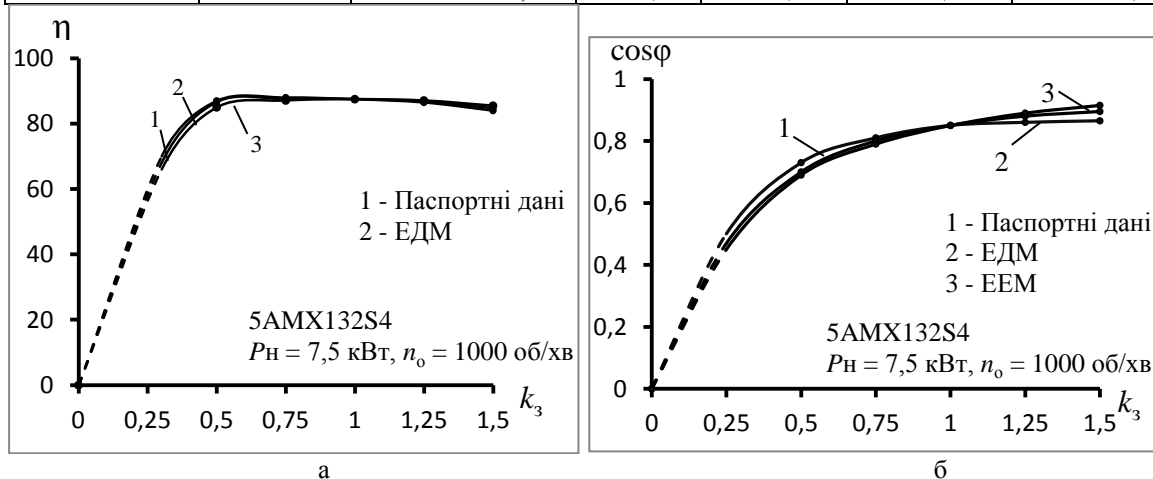


Рис. 2 Результати моделювання АД типу 5АМХ132S4: залежності ККД (а) та коефіцієнта потужності (б) від завантаження

Порівняння даних табл. 1 та рис. 2 показує, що методика дозволяє з достатньою для практики точністю розраховувати узагальнені діагностичні параметри - ККД та коефіцієнт потужності АД в залежності від завантаження. Максимальне значення відносної похибки визначення ККД – 1% для ЕЕМ і 3% для EDM, а коефіцієнта потужності – 4% та 6% відповідно. Таким чином, відносна похибка розрахунку параметрів і характеристик АЕП за методикою функціонального діагностування не перевищує 7%, що є цілком задовільним для інженерної практики.

За методикою в середовищі DELPHI-2009 розроблено програмне забезпечення функціонального діагностування АЕП, яке за результатами вимірювань струмів і напруг дозволяє визначити в реальному часі його технічний та енергетичний стан [4].

Висновки. Розроблено методику функціонального діагностування енергоефективності АЕП, яка за результатами вимірювань експлуатаційних параметрів (струмів і напруг) дозволяє визначити в реальному часі його технічний і енергетичний стан. Методика ураховує якість напруги живлення (відхилення, несиметрію та несинусоїдальність напруги, відхилення частоти), величину і характер навантаження, різницю між моментами на валу й електромагнітним для різних навантажень, гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності, додаткові втрати через несинусоїдальність та несиметрію напруги (визначається за моментом двигуна від струмів зворотної послідовності).

Аналітична перевірка та результати розрахунків на ЕОМ у середовищі MATLAB залежностей ККД, коефіцієнта потужності і робочих параметрів АД промислової серії 5А показали достатньо високу відповідність результатів розрахунків експериментальним даним виробника. Відносна похибка розрахунку параметрів і характеристик АД за методикою функціонального діагностування не перевищує 7%, що цілком достатньо для інженерної практики.

Методика і розроблена програма обчислень можуть застосовуватися в системах моніторингу та функціонального діагностування, а також для проведення порівняльної оцінки енергоефективності різних типів АЕП і перевірки вибраного двигуна для конкретної технологічної установки.

Література

1. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О.О. Закладний. – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с.
2. Праховник А.В. Діагностування енергоефективності електромеханічних систем як інструмент енергоменеджменту / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2011, - Вип. 21. С. 121-128.
3. Закладний О.О. Енергетична модель формування і збереження еталонів для систем функціонального моніторингу асинхронного електропривода / О.О. Закладний, О.М. Закладний, І.В. Притискач // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2011, - Вип. 20. С. 159-166
4. Закладний О.О. Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / О.О. Закладний, О.М. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. №2. С. 102-108.

O. ZAKLADNYI

METHOD OF FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

In this article described the method of functional diagnostics of energy efficiency, energy consumption and energy use processes of the asynchronous electric drive, and the results of analytical test method for asynchronous motors, new industrial series 5A.

Key words: energy efficiency, the asynchronous motor, diagnostics, efficiency factor, power factor.

1. Zakladnyi O.O. Funktsional'ne diahnostuvannya enerhoefektyvnosti elektromekhanichnykh system: Monohrafiya / O.O. Zakladnyi. – K.: Vydavnytstvo «Libra», 2013. – 195 s.
2. Prakhovnyk A.V. Diahnostuvannya enerhoefektyvnosti elektromekhanichnykh system yak instrument enerhomenedzhmentu / A.V. Prakhovnyk, O.M. Zakladnyi, O.O. Zakladnyi // VISNYK Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyyu politekhnichnyy instytut». Seriya «Hirnytstvo»: Zbirnyk naukovykh prats'. – Kyiv: NTUU «KPI»: ZAT «Tekhnovybukh», 2011, - Vyp. 21. S. 121-128.
3. Zakladnyi O.O. Enerhetychna model' formuvannya i zberezhenya etaloniv dlya system funktsional'noho monitorynhu asynkhronnoho elektropryvoda / O.O. Zakladnyi, O.M. Zakladnyi, I.V. Prytyskach // VISNYK Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyyu politekhnichnyy instytut». Seriya «Hirnytstvo»: Zbirnyk naukovykh prats'. – Kyiv: NTUU «KPI»: ZAT «Tekhnovybukh», 2011, - Vyp. 20. S. 159-166

4. Zakladnyi O.O. Prohramne zabezpechennya funktsional'noho diahnostuvannya enerhoeffektivnosti elektromekhanichnykh system z asynkhronnymy dvyhunamy / O.O. Zakladnyi, O.M. Zakladnyi // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiia, ekolohiia. 2011. #2. S. 102-108.

УДК 621.311.001.57(063)

О.А. ЗАКЛАДНОЙ

МЕТОДИКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье приведена методика функционального диагностирования энергоэффективности, процессов энергопотребления и энергоиспользования асинхронного электропривода, а также результаты аналитической проверки методики для асинхронных двигателей новой промышленной серии 5А.

Ключевые слова: энергоэффективность, асинхронный двигатель, диагностирование, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.

УДК 621.311

Р.О. БУЙНИЙ

ВРАХУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАЧІВ ВЗДОВЖ ЛЕП ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ СЕКЦІОНУЮЧИХ КА В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 10 КВ

Запропоновано підхід щодо лінеаризації цільової функції «недовідпуск електричної енергії споживачам» для розподільних електричних мереж напругою 10кВ, який дозволить аналітично визначати раціональні місця встановлення секціонуючих комутаційних апаратів і запропонувати рекомендації щодо місць їх встановлення.

Ключові слова: секціонуючий комутаційний апарат, цільова функція, недовідпуск електричної енергії, залежність розподілу потужності.

Вступ. В даний час існує досконалий математичний апарат, який дозволяє вирішувати задачу підвищення надійності електропостачання споживачів в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ за рахунок вибору раціональних місць встановлення секціонуючих комутаційних апаратів (КА) [1-4]. Проте існуючі методи, зокрема метод нормованих функцій [1] та метод зонних структур [3], дозволяють визначати раціональні місця встановлення КА методом цілеспрямованого перебору можливих місць їх встановлення за значенням найменшого недовідпуску електричної енергії. Тобто розв'язок оптимізаційної задачі відноситься до задач дискретного програмування. Оскільки розподільні мережі напругою 10 кВ мають складнорозгалужену деревоподібну структуру то це призводить до ускладнення розв'язку оптимізаційної задачі навіть із застосуванням сучасною комп'ютерної техніки.

Мета статті. Запропонувати підхід щодо лінеаризації цільової функції «недовідпуск електричної енергії споживачам» для узагальненої електричної мережі довільної конфігурації, що дозволить аналітично визначати раціональні місця встановлення секціонуючих КА.

Основні матеріали дослідження. Значення недовідпуску електричної енергії споживачам залежить від місця встановлення КА, а отже від сумарних потужностей $P_{i\Sigma}$ та сумарних довжин $L_{i\Sigma}$ ділянок (зон) електричної мережі, обмежених секціонуючими КА. Тобто цільова функція недовідпуску електричної енергії нелінійна. Для її лінеаризації можна скористатися функцією, яка в загальному вигляді може бути представлена у вигляді [5]:

$$\Delta W = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{k=1}^m a_k \prod_{i_k=1}^{n_k} X_{i_k}, \text{ при } m \leq \sum_{k=1}^n C_n^k. \quad (1)$$

Проте використання даного підходу призводить різкого зростання розмірності моделі як за кількістю змінних, так і за кількістю обмежень.

Сумарна потужність зон електричної мережі $P_{i\Sigma}$, обмежених секціонуючими КА, зв'язана з їх