

G. Strelkova, K. Rabchuk

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

**INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY LEVEL OF THE AMMONIA SYNTHESIS
PROCESS BASED ON DEVELOPMENT OF A DYNAMIC MODEL**

Ammonia is one of the inorganic chemicals with the highest production rate in the world. The process of ammonia synthesis has a high energy consumption and requires detailed analysis. Such an analysis is feasible and safe using simulation of the process. This paper examines the simulation of the ammonia synthesis reactor and the experiment on the model. The objective of this paper is to develop the basis for a synthesis reactor monitoring tool that can be used to identify the margin to blow-out with respect to current load, catalyst activity, pressure and temperature. For this purpose system dynamics is studied by means of the dynamic modelling. The model is dynamic, and this allows better understanding of the synthesis process in case of the sudden change of the operating parameters.

Keywords: ammonia, reactor, synthesis process, modeling, dynamic model, MATLAB.

1. IndexMundi (February, 2014). Ammonia: Estimated World Production, By Country [Online]. – http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/nitrogen/nitrogen_t12.html.
2. Peteshova T. Diagnostic approach to determine the intensity of competition in the industry market [Online]. – http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2011_4_2_111_117.pdf
3. Morris W. Hirsch, Stephen Smale, Robert L. Devaney. Differential Equations, Dynamical Systems, And An Introduction to Chaos. 2nd ed. // San Diego, California: Elsevier (USA) - 2004. - p. 230.
4. John Morud. Studies On The Dynamics And Operation Of Integrated Plants. A Thesis Submitted For A Degree Of Dr. Ing. // University of Trondheim. The Norwegian Institute of Technology - 1995.

УДК 662.963

Г. Г. Стрелкова, канд. физ.-мат. наук, доцент; К. В. Рабчук

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА АММИАКА
НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА**

Аммиак является одним из неорганических химических веществ с высокой долей производства в мире. Процесс синтеза аммиака является энергозатратным и требует детального анализа. Такой анализ возможен и безопасен при помощи моделирования процесса. Данная статья рассматривает моделирование реактора синтеза аммиака и выполнения эксперимента над моделью. Модель является динамической, что позволяет лучше понять процесс синтеза при внезапном изменении параметров процесса.

Ключевые слова: аммиак, реактор, процесс синтеза, моделирование, динамическая модель, MATLAB.

Надійшла 25.05.2014

Received 25.05.2014

УДК 621.311.001.57(063)

О.О. Закладний, канд. техн. наук; О.М. Закладний, канд. техн. наук, доцент; Д.Ю. Могилат
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**МОДЕЛІ ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ
ЗАМІЩЕННЯ І РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ
ДВИГУНІВ**

У статті наведено моделі діагностування параметрів схеми заміщення і робочих параметрів асинхронних двигунів, а також результати дослідження впливу зниження якості напруги живлення (відхилення та несиметрія напруги, відхилення частоти) на енергетичні характеристики асинхронних двигунів нової промислової серії 5А.

Ключові слова: діагностування, асинхронний двигун, схема заміщення, якість напруги живлення.

Вступ. Експлуатація електромеханічних систем з асинхронними двигунами (АД) має такі особливості: технічний стан і надійність їх роботи спричиняють критичний вплив на рівень виробничих ризиків (простої обладнання тощо); АД використовуються не в номінальних режимах роботи; фізична зношеність - 60-90% і неефективність технологічного обладнання; високий рівень пошкоджуваності (підтримання працездатності АД забезпечується за рахунок ремонтів); витрати на технічне обслуговування і ремонт становлять значну частку загальної структури витрат; висока вартість нового устаткування, тривалі терміни пуско-налагоджувальних робіт; завищена встановлена потужність двигунів. Ці обставини призводять до зниження ефективності електромеханічного перетворення енергії.

Досвід експлуатації промислових установок вказує на те, що енергоефективність АД залежить від різноманітних чинників [1]. Серед них найбільший вплив мають такі: якість напруги живлення, яка регламентується показниками якості електроенергії (ПЯЕ); режим навантаження; умови експлуатації; якість виготовлення, технічного обслуговування і ремонтів; якість активних та конструкційних матеріалів; відповідність застосування виконанню.

Відхилення та несиметрія напруги, відхилення частоти – найбільш значущі фактори зниження рівня енергоефективності АД. Робота АД в умовах неякісної електроенергії призводить до зниження рівня енергоефективності та працездатності устаткування. Так, при відхиленнях ПЯЕ, які перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота АД або взагалі неможлива, або може бути забезпечена лише у випадку значного зменшення навантаження. Зниження енергоефективності АД має місце навіть у випадку, коли ПЯЕ змінюються в межах припустимих стандартами значень.

Аналіз попередніх досліджень. Обслуговування устаткування за регламентом виконується на підставі аналізу показань контрольно-вимірювальних приладів під час періодичних регламентних робіт і за результатами випробувань після ремонтів АД. Енергоефективність АД не визначається, а основними контрольованими параметрами є температура обмоток і підшипникового вузла, опір ізоляції та зазор у підшипниках. Це не дозволяє виявити дефекти, які зароджуються, і запобігти ушкодженню електрообладнання аж до створення аварійної ситуації.

Перспективним підходом методології енергоменеджменту є впровадження постійно діючого моніторингу та діагностування енергоефективності й технічного стану АД для оперативного реагування на погіршення його стану і порушення технологічного режиму [1,2].

Завданнями роботи є:

розроблення моделей діагностування параметрів схеми заміщення і робочих параметрів АД, що враховують якість напруги живлення (відхилення та несиметрію напруги, відхилення частоти), величину і характер навантаження, різницю між моментами на валу й електромагнітним для різних навантажень, гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності;

дослідження впливу зниження якості напруги живлення на енергетичні характеристики АД нової промислової серії 5А.

Метою роботи є розроблення та дослідження моделей діагностування параметрів схеми заміщення і робочих параметрів АД для засобів функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода (АЕП), що за рахунок контролювання у реальному часі його струмів і напруг дозволяє виявляти відхилення поточних експлуатаційних параметрів від нормованих.

Матеріали і результати досліджень. Розроблена модель діагностування параметрів процесу перетворення електроенергії АЕП складається з моделей більш низького рівня: визначення діагностичних параметрів, первинних діагностичних ознак, показників якості електричної енергії, параметрів процесу енергоспоживання, параметрів схеми заміщення, робочих параметрів та визначення параметрів процесу енерговикористання.

Модель діагностування параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів.

Приведені струми ротора АД

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

де $\lambda_1 = \lambda \frac{c_U^2}{c_f}$ - перевантажувальна здатність АД з урахуванням впливу відхилення напруги та частоти від номінальних значень; $c_U = \frac{U}{U_H}$, $c_f = \frac{f}{f_H}$ - коефіцієнти відхилення напруги та частоти від номінальних значень.

Загальні опори фаз статора та їх середнє значення $Z = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} Z_j = \frac{U_\phi}{I_2}$; $Z_j = \frac{U_{\phi j}}{I'_{2j}}$, $j \in \Omega_1$.

Сумарні активні опори обмоток АД, величини яких залежать від ковзання, визначаються з його векторної діаграми

$$R_S = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} R_{Sj} = Z \cos \varphi; R_{Sj} = Z_j \cos \varphi_j, j \in \Omega_1.$$

Індуктивні опори короткого замикання фаз статора зі схеми заміщення АД

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

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

Ковзання двигуна змінюється пропорційно навантаженню. З урахуванням впливу відхилення напруги від номінального значення, ковання

$$s = \frac{I'_2}{I_{2H}} \left(\frac{U_H}{U} \right)^2 s_H = k'_{3I} \frac{s_H}{c_U^2},$$

де $k'_{3I} = \frac{I'_2}{I_{2H}}$ - коефіцієнт завантаження за струмом I'_2 .

Активні опори фаз статора двигуна

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

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

де $\omega'_0 = c_f \omega_0$ - синхронна частота обертання двигуна, що відповідає частоті мережі, відмінній від номінальної.

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

Струми намагнічування з урахуванням впливу відхилення напруги і частоти від номінальних значень $I_\mu = \frac{1}{3} \sum_{j \in \Omega_1} I_{\mu j} = I (\sin \varphi - s \cos \varphi / s_{kf})$; $I_{\mu j} = I_j (\sin \varphi_j - s \cos \varphi_j / s_{kf})$, $j \in \Omega_1$,

де $s_{kf} = \frac{s_K}{c_f}$ - критичне ковання з урахуванням впливу відхилення частоти від номінального значення.

Реактивна потужність намагнічування $Q_\mu = \sqrt{3} U I_\mu$. Індуктивні опори кіл намагнічування фаз

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

У схемі заміщення для струмів зворотної послідовності введено ковання ротора по відношенню до поля зворотної послідовності [3]

$$s_2 = \frac{-\omega_0 - \omega}{-\omega_0} = 2 - s,$$

де $(-\omega_0)$ - кутова швидкість поля зворотної послідовності; $\omega = \omega_0(1 - s)$ - кутова швидкість ротора відносно прямого поля. Частота струмів зворотної послідовності $f_{22} = (2 - s)f_1$ значно вища частоти струмів прямої послідовності у роторі $f_{21} = sf_1$.

Методом симетричних складових розраховуються струми зворотної і нульової послідовностей

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

Модель діагностування робочих параметрів і побудови статичних характеристик асинхронних двигунів

Момент двигуна від струмів прямої послідовності з урахуванням впливу відхилення напруги і частоти від номінальних значень

$$M_1 = \frac{2M_K \frac{c_U^2}{c_f^2} \left(1 + \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f} \right)}{\frac{s_K}{c_f s} + \frac{c_f s}{s_K} + 2 \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}}.$$

За результатами комп'ютерного моделювання різницю між моментом на валу M'_1 і електромагнітним моментом M_1 визначаємо за рівнянням регресії

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

Гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності з урахуванням впливу відхилення напруги і частоти від номінальних значень

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

де $c_{U2} = \frac{U_2}{U_H}$ - відносна напруга зворотної послідовності.

В рушійному режимі $0 < s < 1$, момент $M_2 < 0$. Загальний обертальний момент АД з урахуванням впливу несиметрії напруги живлення визначається сумою моментів M_1 і M_2

$$M = M_1 + M_2.$$

Коефіцієнт завантаження АД за моментом

$$k_{3M} = \frac{M}{M_H} = \frac{M_1 + M_2}{M_H}.$$

Частота обертання двигуна з урахуванням відхилення частоти мережі від номінального значення

$$\omega = c_f \omega_0 (1 - s).$$

З використаннями розроблених моделей діагностування в середовищі MATLAB побудовано характеристики АД серії 5А типу 6А315LA4. Номінальні дані двигуна [4]: $P_H = 160$ кВт, $n_H = 1485$ об/хв, $U_H = 380$ В, $I_H = 272$ А, $\eta_H = 95,3\%$, $\cos\phi_H = 0,89$. У процесі комп'ютерного моделювання значення напруг та струмів формувалися як реальні сигнали від задавального пристрою.

ГОСТ 13109-97 встановлює на затискачах електропривода нормально і гранично припустимі усталені відхилення напруги $\delta U_y = \pm 5\%$ і $\pm 10\%$ номінальної напруги мережі. Як видно з графіків рис. 1, у випадку зниження напруги на двигуні відносно номінальної за умови споживання тієї самої потужності зростає струм двигуна (при зниженні напруги на 10% струм статора збільшується на 10%, струм ротора - на 14%). Відповідно зростають нагріваючі втрати, що призводить до перегрівання ізоляції, її старіння і, як наслідок, до збитків, зумовлених скороченням терміну служби АД [5].

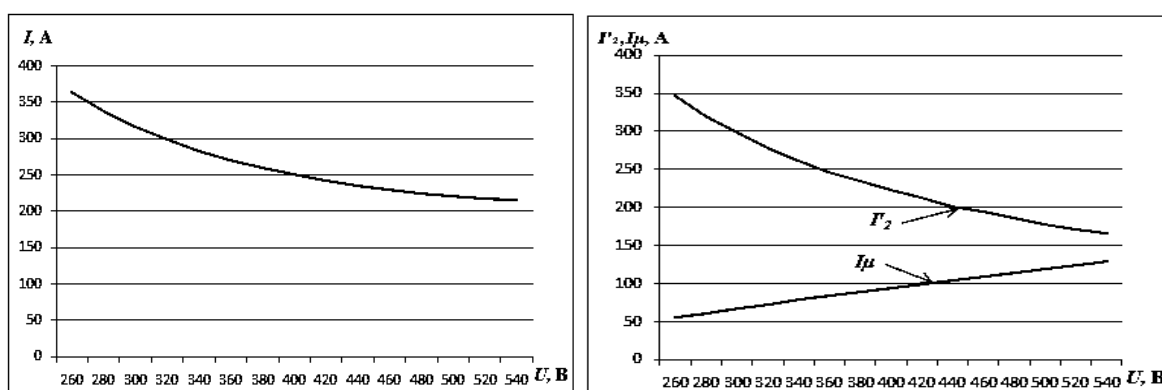


Рис. 1 Залежності середнього діючого значення струму статора, приведенного струму ротора та струму намагнічування АД від відхилення напруги від номінальної

Підвищення напруги на двигуні призводить до збільшення споживаної ним реактивної потужності й зниження коефіцієнта потужності, що негативно впливає на енергетичну ефективність. У середньому на кожен процент підвищення напруги споживана реактивна потужність зростає на 1,5% і більше за рахунок збільшення струму намагнічування (рис. 1).

Відповідно до ГОСТ 13109-97 нормально і гранично припустимі відхилення частоти Δf складають $\pm 0,2$ і $\pm 0,4$ Гц. З графіків рис. 2 видно, що у разі зниження частоти на двигуні відносно номінальної для номінальних напруги і навантаження струм ротора змінюється пропорційно частоті. Для двигунів з невеликим значенням струму холостого ходу струм статора зменшується, навпаки, для двигунів з великим значенням струму холостого ходу він буде зростати через різке збільшення струму намагнічування [6]. Відповідно зростає реактивна потужність, що споживається, і знижується коефіцієнт потужності.

Зростання частоти на 4% збільшує струм статора на 6,6%. Збільшуються також індуктивні опори двигуна (рис. 3). Відповідно зростають постійні втрати (в сталі – за рахунок збільшення частоти, механічні - через збільшення швидкості двигуна), змінні - за рахунок зростання струму, а також втрати на гістерезис і вихрові струми.

Нормально і гранично припустимі значення коефіцієнтів несиметрії напруги зворотної K_{2U} і нульової K_{0U} послідовностей становлять 2% і 4% відповідно ГОСТ 13109-97. З графіків рис. 4 видно, що збільшення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності K_{2U} призводить до зростання струму двигуна.

Незначна несиметрія трифазної системи напруг (1%) викликає значні струми зворотної послідовності I_{2U} (7–9%), що призводить до додаткового нагрівання статора й ротора [7]. Щоб уникнути додаткового нагрівання, навантаження двигуна повинно бути знижено. Згідно рекомендації МЭК 892 номінальне навантаження двигуна припустиме для $K_{2U} < 1\%$. Якщо коефіцієнт зворотної послідовності дорівнює 2%, навантаження двигуна повинно бути знижено до 96%, якщо 4% - до 84%.

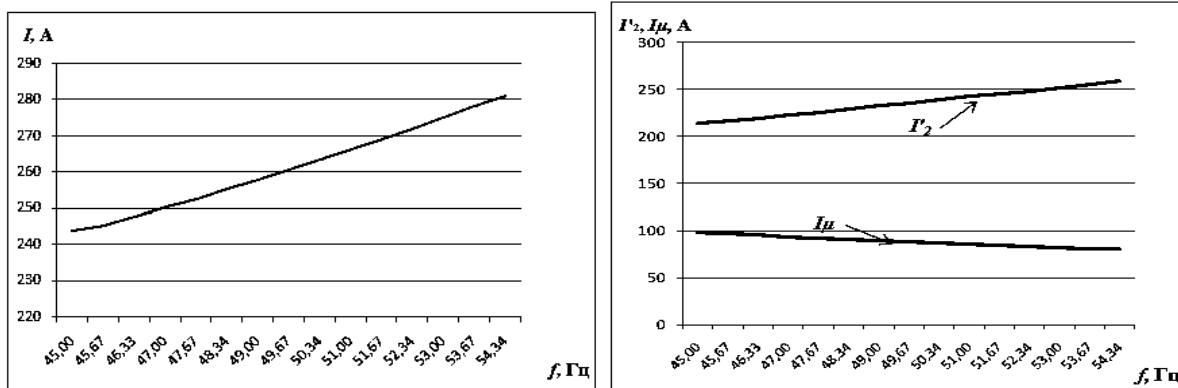


Рис. 2 Залежності середнього діючого значення струму статора, приведенного струму ротора, струму намагнічування, ковзання АД від відхилення частоти мережі від номінальної

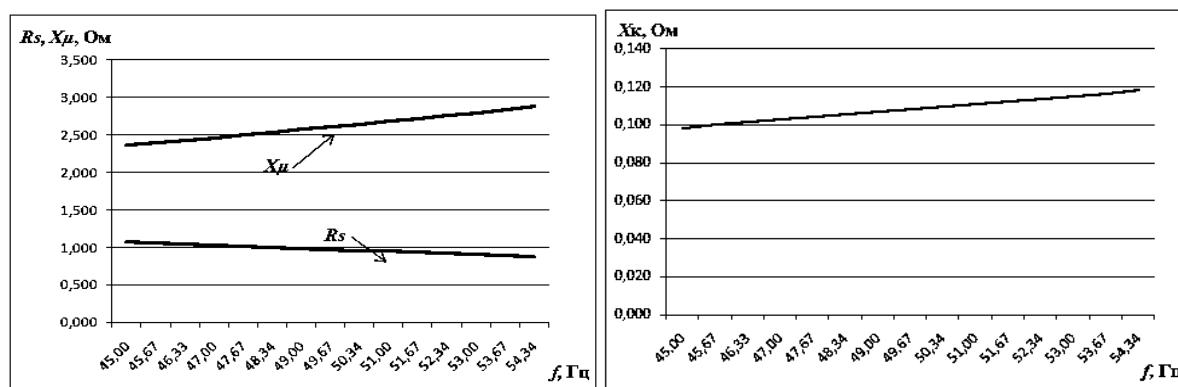


Рис. 3 Залежності сумарного активного та індуктивного опору кола намагнічування, індуктивного опору короткого замикання АД від відхилення частоти мережі від номінальної

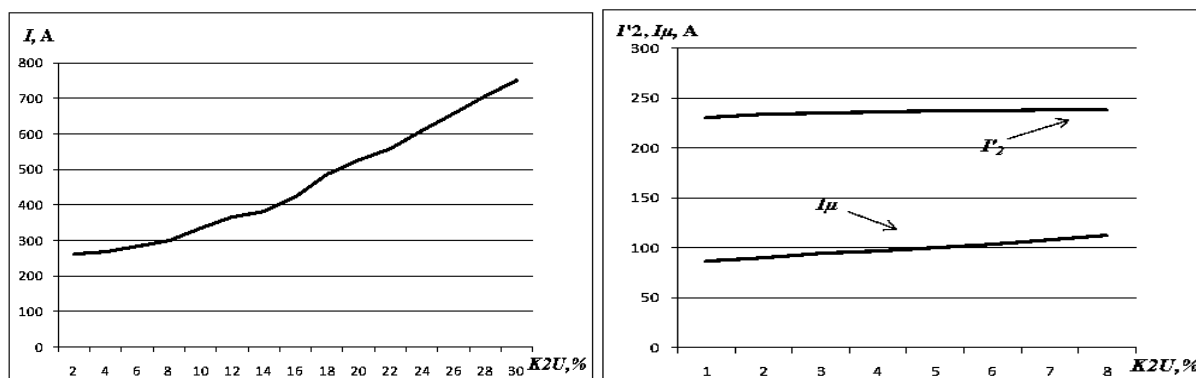


Рис. 4 Залежності середнього діючого значення струму статора, приведенного струму ротора, струму намагнічування АД від несиметрії напруг

Висновки

1. Розроблено математичні моделі діагностування параметрів схеми заміщення і робочих параметрів АД для засобів функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода. Моделі враховують якість напруги живлення (відхилення та несиметрію напруги, відхилення частоти), величину і характер навантаження, різницю між моментами на валу й електромагнітним для різних навантажень, гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності.

2. Проведені дослідження впливу зниження якості напруги живлення на енергетичні характеристики АД нової промислової серії 5А та їх аналіз доводять правомірність і адекватність розроблених моделей. Відповідно до отриманих результатів розрахунків та графіків діагностування параметрів схеми заміщення і робочих параметрів АД моделі дозволяють виконувати великі обсяги досліджень для розв'язування практичних задач розрахунку енергетичних характеристик з метою підвищення його енергоефективності.

Список літератури

1. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О.О. Закладний. – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с.
2. Закладний О.М. Засоби функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем / О.М. Закладний, О.О. Закладний, В.М. Чермалих // Науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012 – Вип. 3/2012 (19) – 628-631 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – [3-е изд.]. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
4. Технический каталог. Асинхронные электродвигатели. - М.: РУСЭЛПРОМ, 2008. – 116 с.
5. Карташев И.И. Управление качеством электроэнергетики / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
6. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – [4-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
7. Соркин М.А. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы [Электронный ресурс] / М.А. Соркин // Новости электротехники. - 2005. - №2(32):. <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php>.

О.О. Zakladnyi, O.M. Zakladnyi, D.Yu. Mogylat

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

MODELS OF DIAGNOSTICS PARAMETERS EQUIVALENT CIRCUITS AND PERFORMANCE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

The paper presents the model diagnostics parameters of the equivalent circuit and the operating parameters of asynchronous motors, and the results of the study the effect of reducing the quality of the supply voltage (bias and unbalanced voltage, frequency deviation) on the energy characteristics of a new industrial asynchronous motors 5A series.

Key words: diagnostics, asynchronous motors, the equivalent circuit, the quality of the supply voltage.

1. Zakladnyy O.O. Funktsional'ne diahnostuvannya enerhoefektyvnosti elektromekhanichnykh system: Monohrafiya / O.O. Zakladnyy. – K.: Vydavnytstvo «Libra», 2013. – 195 s.
2. Zakladnyy O.M. Zasoby funktsional'noho diahnostuvannya enerhoefektyvnosti elektromekhanichnykh system / O.M. Zakladnyy, O.O. Zakladnyy, V.M. Chermalykh // Naukovo-tekhnichna konferentsiya «Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriya y praktyka». Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Tematychnyy vypusk naukovo-vyrobnychoho zhurnalulu – Kremenchuk: KrNU, 2012 – Vyp. 3/2012 (19) – 628-631 s.
3. Vol'dek A.Y. Elektricheskiye mashyny. Uchebnyk dlya studentov vyssh. tekhn. uchebn. zavedenyy / A.Y. Vol'dek. – [3-e yzd.]. – L.: Enerhyya, 1978. – 832 s.
4. Tekhnicheskyy kataloh. Asynkhronnyye elektrodvyhately. - M.: RUSЭЛПРОМ, 2008. – 116 s.
5. Kartashev Y.Y. Upravlenye kachestvom elektroenerhy / Y.Y. Kartashev, V.N. Tul'skiy, R.H. Shamonov y dr.; pod red. Yu.V. Sharova. – M.: Yzdatel'skiy dom МЭУ, 2006. – 320 s.
6. Сыромятныков Y.A. Rezhymy raboty asynkhronnykh y synkhronnykh dvyhateley / Y.A. Сыромятныков; pod red. L.H. Мамыконианца. – [4-е yzd.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
7. Sorkynd M.A. Asynkhronnyye elektrodvyhately 0,4 kV. Avariynnye rezhymy raboty [Elektronnyy resurs]/M.A. Sorkynd// Novosty elektrotekhniky. -2005.- №2(32):. <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php>

УДК 621.311.001.57(063)

О.А. Закладной, А.Н. Закладной, Д.Ю. Могилат

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И РАБОЧИХ
ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В статье приведены модели диагностирования параметров схемы замещения и рабочих параметров асинхронных двигателей, а также результаты исследования влияния снижения качества напряжения питания (отклонение и несимметрия напряжения, отклонение частоты) на энергетические характеристики асинхронных двигателей новой промышленной серии 5А.

Ключевые слова: диагностирование, асинхронный двигатель, схема замещения, качество напряжения питания.

Надійшла 23.02.2014

Received 23.02.2014