

## МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

*У статті наведено модель діагностування параметрів процесу енерговикористання асинхронного електропривода, а також результати дослідження впливу величини механічного навантаження та зниження якості напруги живлення на енергетичні характеристики асинхронних двигунів нової промислової серії 5А.*

**Ключові слова:** енерговикористання, енергоефективність, асинхронний двигун, діагностування, коефіцієнт потужності.

**Вступ.** Однією з найважливіших проблем підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції на світовому ринку є зниження енергетичної складової в структурі її собівартості. Вартість електроенергії, яку споживає електромеханічна система з асинхронним електроприводом (АЕП) протягом строку експлуатації (життєвого циклу), значно перевищує вартість устаткування і витрати на обслуговування. Експлуатація АЕП, які знаходяться в незадовільному технічному стані, призводить до збільшення фінансових витрат, зумовлених зростанням електроспоживання.

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.** Ефективність енергозберігаючих заходів значною мірою визначається енергоефективністю АЕП, і нині вона лишається низькою. Основною причиною низької енергоефективності АЕП та виникнення аварій є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, відсутність ефективного безперервного захисту двигунів, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, недостатній рівень експлуатації, неякісний ремонт тощо.

В літературі [2] з питань енергоефективності ЕМС пропонуються проекти з енергозбереження, але їх реалізація потребує значних коштів. На сьогодні виникла необхідність застосування нових технічних рішень і наукових підходів до вирішення проблеми підвищення рівня енергоефективності АЕП.

Неврахування зв'язків між процесами перетворення енергії та їх наслідками є істотним недоліком існуючих засобів діагностування АЕП. Це не дозволяє встановити причини, які призводять до погіршення енергоефективності, виникнення і розвитку несправностей та аварій. Існує взаємозв'язок між якістю електроенергії, режимом навантаження, процесами перетворення енергії та технічним станом АЕП.

### **Завданнями роботи є:**

розроблення моделі діагностування параметрів процесу енерговикористання АЕП, яка контролює параметри схеми заміщення і робочі з урахуванням режиму навантаження та якості напруги живлення;

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

**Метою роботи** є розроблення та дослідження моделі діагностування параметрів процесу енерговикористання для засобів функціонального діагностування енергоефективності АЕП, які за рахунок контролювання у реальному часі його поточних експлуатаційних параметрів дозволяють визначити неефективні режими роботи та прийняти обґрунтовані рішення щодо подальшої експлуатації.

**Матеріали і результати досліджень.** Розроблена модель діагностування параметрів процесу перетворення електроенергії АЕП складається з моделей більш низького рівня: визначення діагностичних параметрів, визначення первинних діагностичних ознак, визначення показників якості електричної енергії, визначення параметрів процесу енергоспоживання, визначення параметрів схеми заміщення та визначення параметрів процесу енерговикористання (рис. 1) [3].

У розробленій моделі діагностування параметрів процесів перетворення електроенергії АЕП припускається, що двигун живиться номінальною напругою стандартної частоти, не враховується насичення сталі машини, магнітні поля розподілені навколо зазору синусоїдально, фазні обмотки статора зсунуті між собою в просторі на 180 ел.град, статор і ротор магнітосиметричні.

*Визначення параметрів процесу енерговикористання.*

Потужність на валу

$$P = M\omega .$$

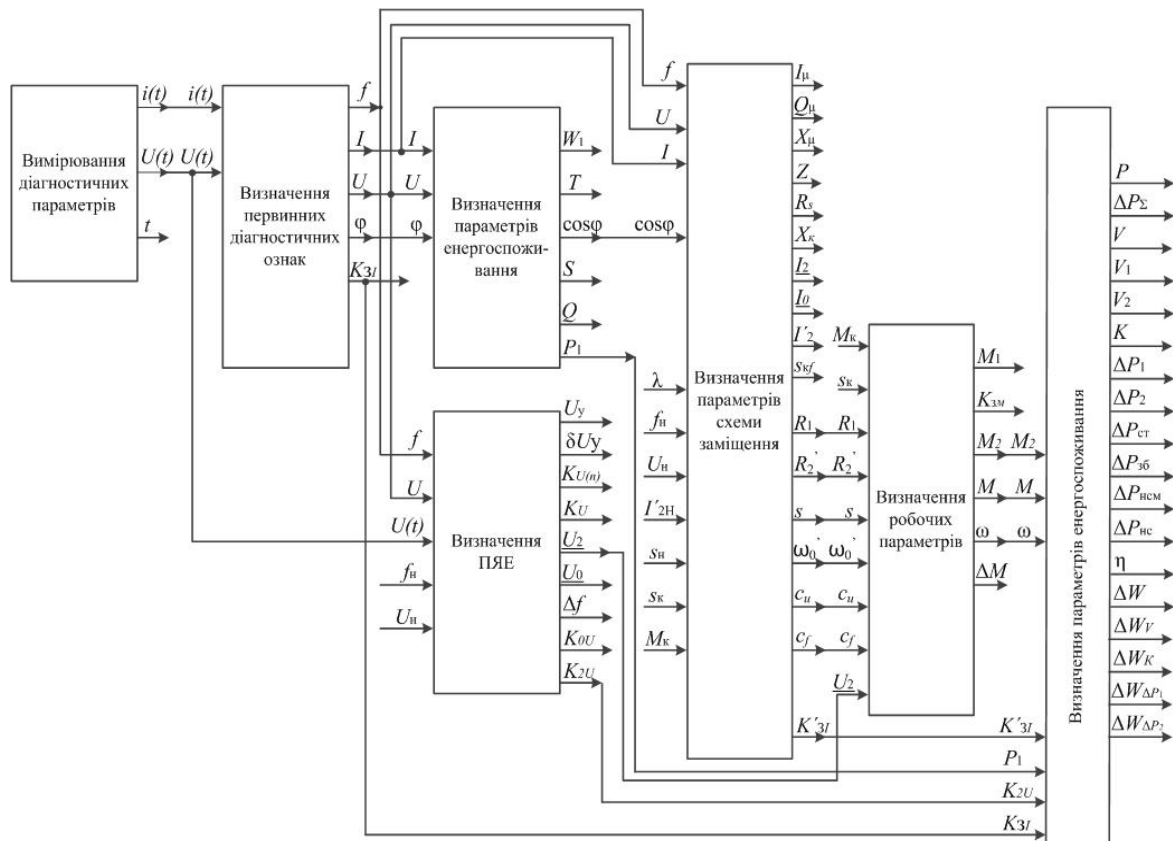


Рис. 1 Структурна схема моделі діагностування параметрів процесу перетворення електроенергії АЕП

Сумарні втрати потужності

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P = K + V + \Delta P_1 + \Delta P_2 ,$$

де  $\Delta P_2$  - додаткові втрати.

Постійні втрати потужності містять втрати: у сталі статора і ротора  $\Delta P_{СТ}$ ; механічні від тертя в підшипниках і вентиляційні  $\Delta P_{МЕХ} = 0,01P_H$ ; збудження - у міді обмотки статора від протікання струму намагнічування  $I_{\mu}$

$$K = \Delta P_{СТ} + \Delta P_{МЕХ} + 3I_{\mu}^2 R_1 .$$

Втрати в сталі

$$\Delta P_{СТ} = K - \Delta P_{МЕХ} - 3I_{\mu}^2 R_1 = \Delta P_{СТН} c_U^2 ,$$

де  $\Delta P_{СТН}$  - номінальні втрати потужності у сталі.

Якщо навантаження відрізняється від номінального, то повні змінні втрати  $V = V_H k_{3I}^2$ , або для Г-подібної схеми заміщення  $V = V_1 + V_2 = 3I_2^2 (R_1 + R_2')$ .

Додані (паразитні) втрати визначаються втратами на гістерезис і вихрові струми в режимі холостого ходу та під навантаженням  $\Delta P_1 = \Delta P_{1H} k_{3I}^2$ .

Додаткові втрати в обмотках і сердечниках двигуна  $\Delta P_2 = \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}$  обумовлені несиметрією  $\Delta P_{НСМ}$  та несинусоїдальністю  $\Delta P_{НС}$  напруги живлення.

Додаткові втрати від несиметрії напруги визначаємо як потужність, витрачену на подолання гальмівного моменту двигуна  $M_2$  від струмів зворотної послідовності

$$\Delta P_{НСМ} = M_2 \omega .$$

Додаткові втрати від несинусоїдальності напруги

$$\Delta P_{НС} = 2 \lambda_{П}^2 V_{1H} \sum_{v=n}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} ,$$

де  $U_v^2$ - відношення напруги  $v$ - і гармоніки до номінальної [4].

ККД електромеханічного перетворювача являє собою відношення механічної потужності на валу до потужності, яка споживається з мережі:

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P + \Delta P_{\Sigma}}$$

Для змінного характеру навантаження за цикл роботи  $T_{ц}$  значення ККД

$$\eta = \frac{\int_0^{T_{ц}} P dt}{\int_0^{T_{ц}} P dt + \int_0^{T_{ц}} \Delta P_{\Sigma} dt}$$

Втрати енергії за цикл  $T_{ц}$

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_0^{T_{ц}} \Delta P_{\Sigma}(t) dt = \int_0^{T_{ц}} K(t) dt + \int_0^{T_{ц}} V(t) dt + \int_0^{T_{ц}} \Delta P(t)_1 dt + \int_0^{T_{ц}} \Delta P_2(t) dt = \\ &= \Delta W_K + \Delta W_V + \Delta W_{\Delta P_1} + \Delta W_{\Delta P_2}, \end{aligned}$$

де  $\Delta W_K, \Delta W_V, \Delta W_{\Delta P_1}, \Delta W_{\Delta P_2}$  — втрати енергії, обумовленні відповідними втратами потужності. Для роботи двигуна з циклічним навантаженням, втрати енергії

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

де  $\Delta P_{\Sigma i}, t_i$  — втрати потужності і час роботи при навантаженні  $K_{3i} = \frac{I_i}{I_n}$ ;  $n$  - число значень навантаження

на окремих ділянках;  $\sum_{i=1}^n t_i = T_{ц}$  — час циклу.

Моделі діагностування параметрів процесу використання енергії, що споживається, та змінних втрат АД в середовищі MATLAB Simulink наведено на рис. 2 і 3 відповідно.

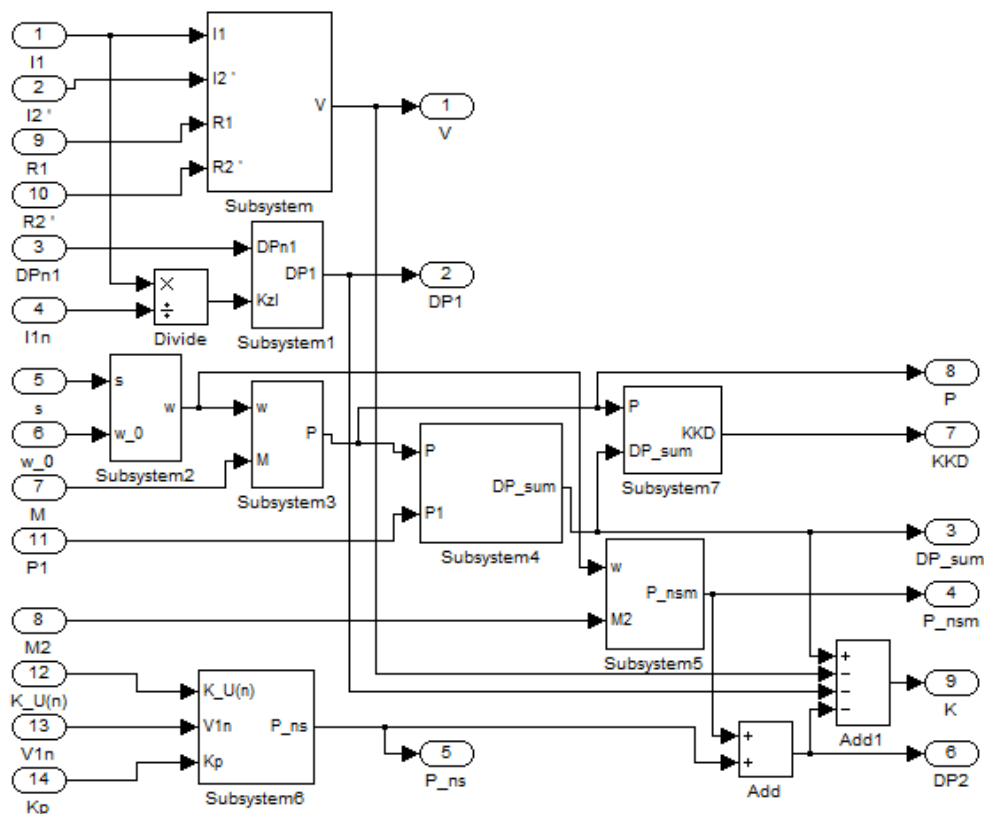


Рис. 2 Модель діагностування параметрів процесу енерговикористання АД

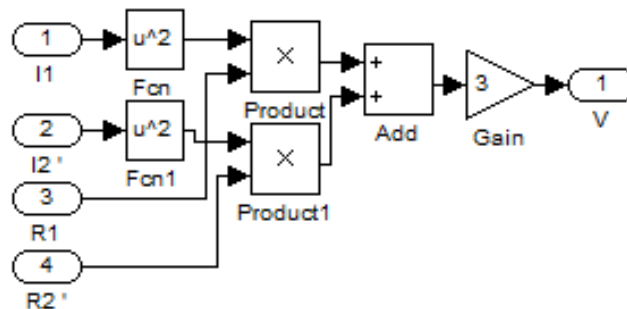
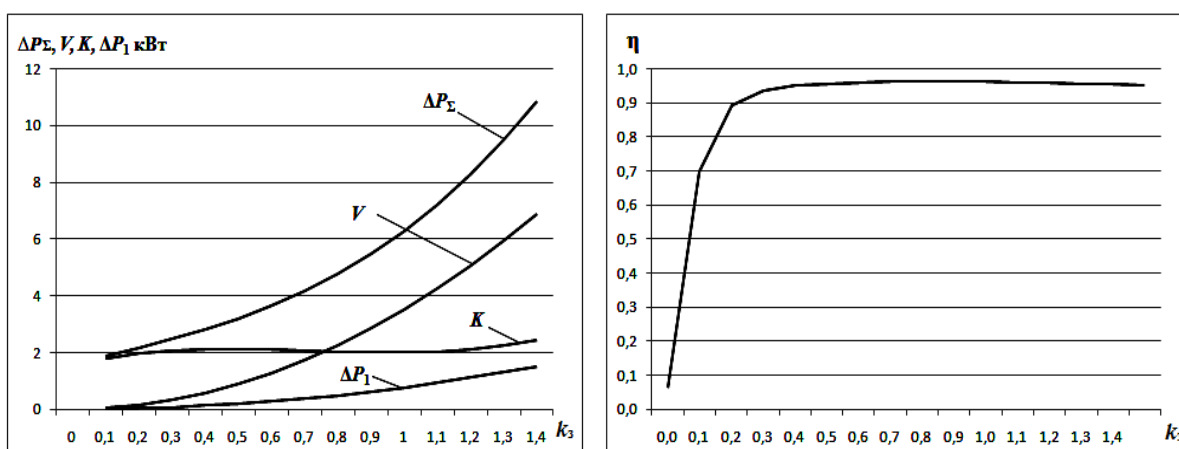


Рис. 3 Модель діагностування змінних втрат АД

З використанням розробленої моделі діагностування в середовищі MATLAB побудовано характеристики АД серії 5А типу 6А315ЛА4 (рис. 4). Номінальні дані двигуна [5]:  $P_H = 160$  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.

Рис. 4 Залежності параметрів процесу енерговикористання АД ( $\Delta P_{\Sigma}$ ,  $V$ ,  $K$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\eta$ ) від коефіцієнта завантаження

Величина коефіцієнта завантаження варіювалась у бік збільшення (рис. 4). Характерним є зростання повних втрат за рахунок збільшення змінних та доданих. За низьких значень коефіцієнта завантаження ККД двигуна зменшується на 5–7%.

ГОСТ 13109-97 встановлює на затискачах ЕП нормально і гранично припустимі усталені відхилення напруги  $\delta U_y = \pm 5\%$  і  $\pm 10\%$  номінальної напруги мережі.

Параметри процесу енерговикористання (рис. 5) зі зростанням напруги покращуються (зменшується струм на 7%, знижуються нагріваючі втрати, і дещо збільшується ККД), тому з точки зору нагрівання двигуна більш небезпечними є негативні відхилення напруги. За умови споживання тієї самої потужності зростає струм двигуна (зі зниженням напруги на 10% струм статора збільшується на 10%, струм ротора - на 14%). Зростають нагріваючі втрати, що призводить до перегрівання ізоляції, її старіння і, як наслідок, до збитків, зумовлених скороченням терміну служби АД [4].

Відповідно до ГОСТ 13109-97 нормально і гранично припустимі відхилення частоти  $\Delta f$  становлять  $\pm 0,2$  і  $\pm 0,4$  Гц. Причиною відхилення частоти може бути зміна балансу активної потужності.

Зростання частоти на 4% збільшує струм статора на 6,6%. 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. Це призводить до зменшення ККД на 0,6% (рис. 6).

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].

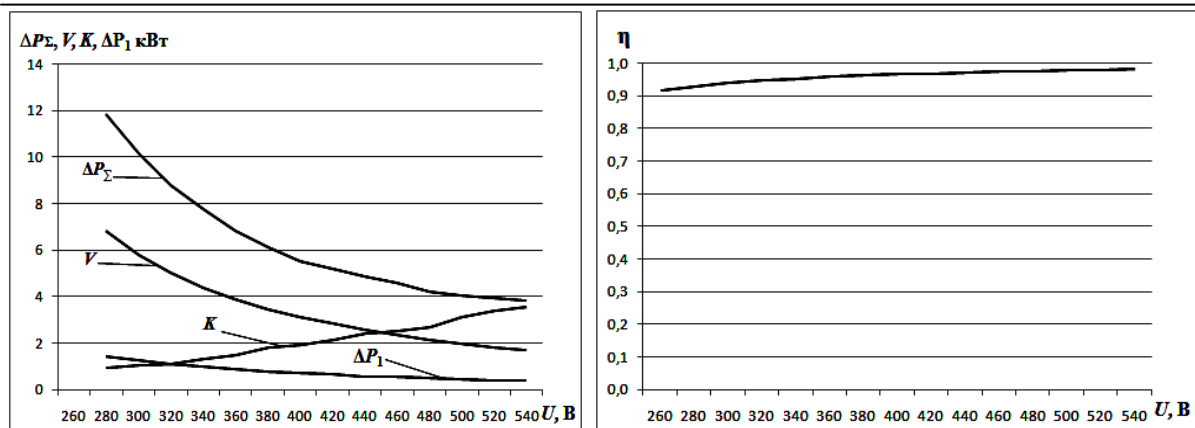


Рис. 5 Залежності параметрів АД ( $\Delta P_{\Sigma}$ ,  $V$ ,  $K$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\eta$ ) від відхилення напруги від номінальної для номінального навантаження

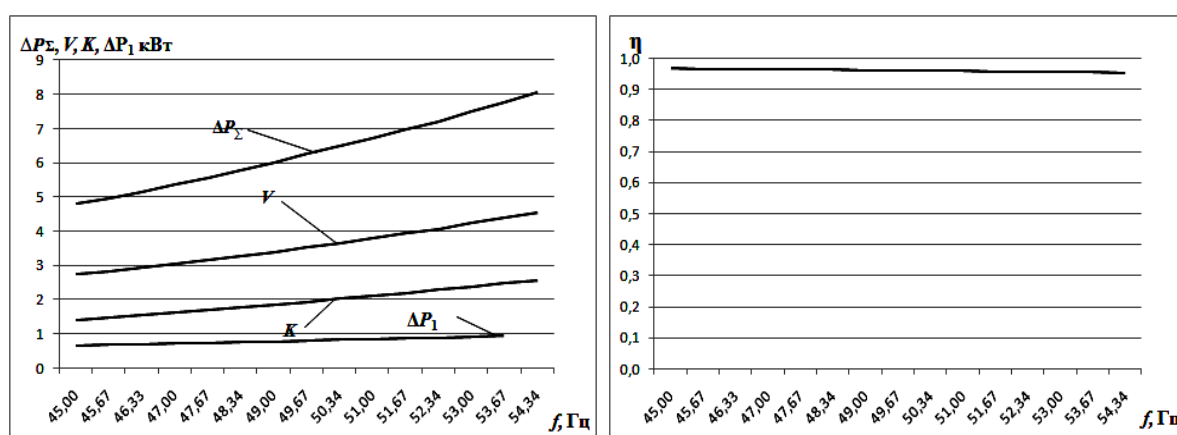


Рис. 6 Залежності параметрів АД ( $\Delta P_{\Sigma}$ ,  $V$ ,  $K$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\eta$ ) від відхилення частоти мережі від номінальної для номінальних завантаження і напруги

Відповідно до ГОСТ 13109-97 нормально і гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  для мережі 0,38 кВ становлять 8% і 12%.

Як видно з графіків рис. 7, зі збільшенням коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  сумарні втрати зростають на 10% за рахунок збільшення додаткових втрат від несинусоїдальності напруги. Втрати мають найбільше значення на частотах вищих гармонік низьких порядків, у першу чергу 3, 5 і 7. Перевищення допустимих значень коефіцієнтів 2, 5 і 8 гармонік призводить до зростання напруги зворотної послідовності, 3 і 9 - до збільшення напруги нульової послідовності, 4 і 7 - до зростання активного опору ротора і погіршення механічної характеристики АД [7].

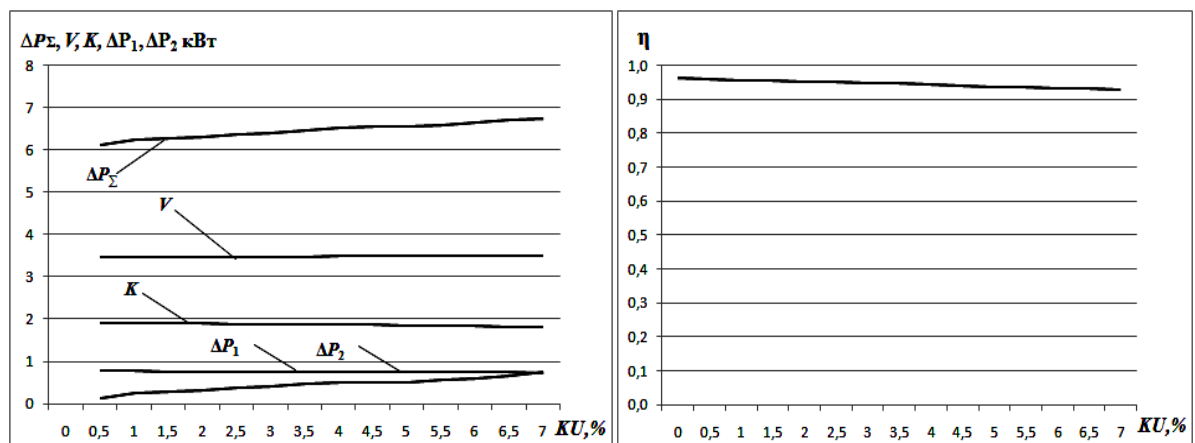


Рис. 7 Залежності параметрів АД ( $\Delta P_{\Sigma}$ ,  $V$ ,  $K$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\eta$ ) від несинусоїдальності напруги

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. 8 видно, що збільшення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності  $K_{2U}$  призводить до значного зростання втрати потужності ( $K_{2U} = 2\%$  – на 10%,  $K_{2U} = 4\%$  – на 25%) і відповідно зниження ККД.

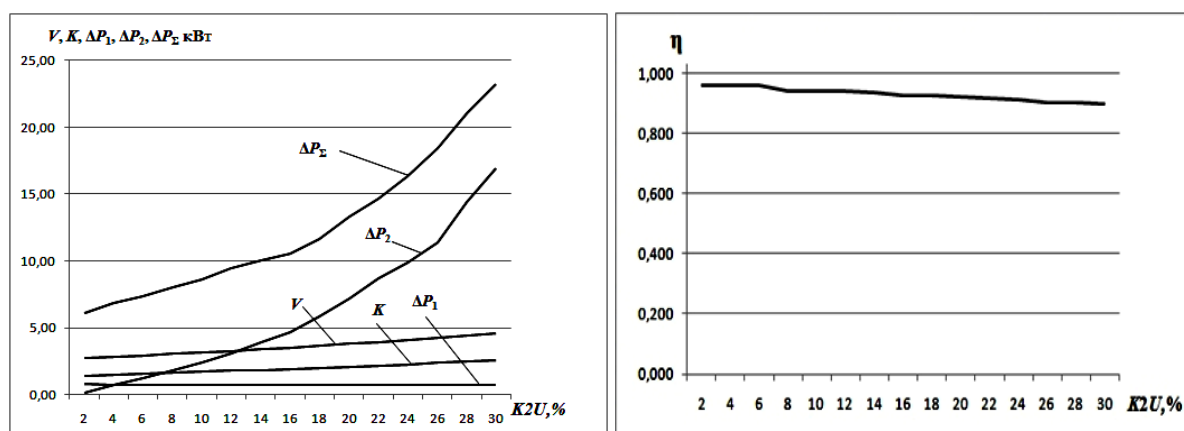


Рис. 8 Залежності параметрів АД ( $\Delta P_2$ ,  $I$ ,  $K$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\eta$ ) від несиметрії напруги

Опір зворотної послідовності АД приблизно дорівнює опору загальмованого двигуна, а отже в 5–8 разів менший опору прямої послідовності [4]. Тому незначна несиметрія трифазної системи напруг (1%) викликає значні струми зворотної послідовності  $I_{2U}$  (7-9%), а в чотирипровідних мережах — струми нульової послідовності  $I_{0U}$ , що призводить до додаткового нагрівання статора й ротора. 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 знижене до 96%, якщо 4% – до 84%.

### Висновки

1. Розроблено математичну модель діагностування параметрів процесу енерговикористання АЕП, яка за результатами вимірювань експлуатаційних параметрів (струмів і напруг) дозволяє визначити в реальному часі його технічний і енергетичний стан. Модель ураховує якість напруги живлення, величину і характер навантаження, додаткові втрати через несинусоїдальність та несиметрію напруги (визначається за моментом двигуна від струмів зворотної послідовності).

2. Проведені дослідження на ЕОМ у середовищі MATLAB впливу зниження якості напруги живлення і величини навантаження на енергетичні характеристики АД нової промислової серії 5А та їх аналіз доводять правомірність і адекватність розробленої моделі. Відповідно до отриманих результатів розрахунків та графіків діагностування параметрів процесу енерговикористання АЕП модель дозволяє 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. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України. / [Праховник А.В., Дешко В.І., Закладний О.М. та ін.]. – Луганськ: вид-во "Місячне сяйво", 2009. - 696 с.
3. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода / О.О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №1. С. 77-82.
4. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
5. Технический каталог. Асинхронные электродвигатели. - М.: РУСЭЛПРОМ, 2008. – 116 с.
6. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. – [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>.

O. Zakladnyi

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

**MODEL OF FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF ENERGY CONSUMPTION OF  
ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE**

*The article describes the model diagnostics parameters asynchronous electric drive energy use process and the results of studies of the effect size of the load and reduce the quality of the supply voltage on the energy characteristics of a new industrial asynchronous motors 5A series.*

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

1. Zakladnyi O.O. Functional diagnostics efficiency electromechanical systems Monograph / O.O. Zakladnyi. – K.: Vydavnytstvo «Libra», 2013. – 195 s.
2. A practical guide to energy saving for industrial, construction and housing and communal services of Ukraine./ [Prakhovnyk A.V., Dshko V.I., Zakladnyi O.M. ta in.]. – Luhansk: vyd-vo "Misyachne syayvo", 2009. - 696 s.
3. Zakladnyi O.O. Method of functional diagnostics of energy efficiency of asynchronous electric drive / O.O. Zakladnyy // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiya, ekolohiya. 2013. #1. S. 77-82.
4. Shydlovskiy A.K. Improving the quality of energy in electric networks / A.K. Shydlovskiy, V.H. Kuznetsov. – K.: Nauk. dumka, 1985. – 268 s.
5. Technical catalog. Asynchronous motors. - M.: RUSELPROM, 2008. – 116 s.
6. Syromyatnykov Y.A. Modes of asynchronous and synchronous motors / Y.A. Syromyatnykov. – [4-e yzd.]. – M.: Enerhoatomyzdat, 1984. –240 s.
7. Sorkynd M.A. Induction motors 0.4 kV. Emergency operations [E-resource]/ M.A. Sorkynd // Novosti elektrotekhnky. - 2005. - #2(32). <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php>.

УДК 621.311.001.57(063)

О.А. Закладной, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

**МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА  
ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

*В статье приведена модель диагностирования параметров процесса энергоиспользования асинхронного электропривода, а также результаты исследования влияния величины механической нагрузки и снижения качества напряжения питания на энергетические характеристики асинхронных двигателей новой промышленной серии 5А.*

**Ключевые слова:** энергоиспользование, энергоэффективность, асинхронный двигатель, диагностирование, коэффициент мощности.

Надійшла 23.10.2013

Received 23.10.2013