

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.311.001.57(063)

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент; Є.Г. Брижіцький, студент  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

*У статті проаналізовано фактори впливу на енергетичну ефективність електромеханічних систем: якість напруги живлення, режим навантаження, умови експлуатації; якість виготовлення, технічного обслуговування і ремонтів; якість активних та конструкційних матеріалів. Критичний вплив в реальних умовах експлуатації спричиняє якість напруги живлення та режим навантаження. За допомогою математичного моделювання показано, що при відхиленнях показників якості електричної енергії, які перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота електромеханічних систем або взагалі неможлива, або може бути забезпечена лише у випадку значного зменшення навантаження. Суттєве зниження енергоефективності електромеханічних систем має місце навіть у випадку, коли показники якості електричної енергії змінюються у межах припустимих стандартами значень.*

**Ключові слова:** енергоефективність, електромеханічна система, якість напруги живлення, режим навантаження.

**Вступ.** Досвід експлуатації промислових установок вказує на те, що енергоефективність електромеханічних систем (ЕМС) залежить від різноманітних чинників. Серед них найбільший вплив мають такі: якість напруги живлення, режим навантаження, умови експлуатації; якість виготовлення, технічного обслуговування і ремонтів; якість активних та конструкційних матеріалів; відповідність застосування виконанню [1].

**Метою роботи є:** дослідження впливу величини механічного навантаження та зниження якості напруги живлення на енергетичні характеристики ЕМС з асинхронними двигунами (АД).

**Аналіз попередніх досліджень.** Робота ЕМС в умовах неякісної електроенергії призводить до зниження рівня енергоефективності та працездатності устаткування. Так, при відхиленнях показників якості електричної енергії (ПЯЕ), які перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота ЕМС або взагалі неможлива, або може бути забезпечена лише у випадку значного зменшення навантаження. Суттєве зниження енергоефективності ЕМС має місце навіть у випадку, коли ПЯЕ змінюються у межах припустимих стандартами значень.

Можливі два варіанти вирішення проблеми, а саме, - робота зі зниженими ККД, коефіцієнтом потужності, з потребою частіших ремонтів та заміни устаткування або використання сучасних методів регулювання якості електроенергії з застосуванням новітніх силових електронних компонентів [2].

Відхилення напруги мережі змінює момент АД, а також реактивну потужність. Для забезпечення тривалої безвідмовної роботи двигуна напруга живлення не повинна бути вищою на 10% та нижчою на 5% від номінальної.

Несиметрія напруг викликає значні струми зворотної послідовності, які підвищують втрати та зменшують момент і потужність двигуна, тому він не може працювати в таких умовах з номінальним навантаженням на валу внаслідок надмірного перегрівання.

Несинусоїдальність напруги призводить до зростання опору обмоток струмам вищих гармонік, що викликає в двигуні суттєві втрати активної потужності та підвищене нагрівання.

Характер навантаження двигуна залежить від механізму, який він приводить у рух. Двигуни можуть працювати зі сталим навантаженням, або мати змінний характер роботи. Один і той само механізм залежно від технологічних умов роботи може працювати з різними графіками електричних навантажень.

АД розробляється для роботи з навантаженням 75-100% від номінальної потужності. Для зазначеного діапазону навантажень ККД близький до номінального. Для коефіцієнту потужності такий діапазон дещо вужчий [1].

Сучасні ЕМС мають високі значення ККД та коефіцієнта потужності за умови роботи в номінальному режимі. Через недосконалу експлуатацію коефіцієнт завантаження багатьох установок не перевищує 0,5 [1, 3]. Наприклад, електроприводи насосів комунального водопостачання завантажено на 20-30% від їх

встановленої потужності [3]. Тимчасом у країнах Західної Європи середнє завантаження ЕМС перевищує 0,6.

Робота ЕМС в недовантаженому режимі призводить до значних втрат, зниження ККД та коефіцієнта потужності. Встановлюється неефективний баланс складових потужності (зі збільшеним рівнем реактивної), що підвищує втрати в живильних мережах. На деяких підприємствах фактичні питомі реактивні навантаження досягають величини 1,4–1,6 квар/кВт, що майже вдвічі перевищує їх номінальні питомі реактивні навантаження. В АД основну частину балансу реактивної потужності становить потужність холостого ходу, яка може складати до 60% реактивної потужності двигуна за умови 100% завантаження [4].

За даними [5], навіть підвищення ККД ЕМС з АД на 2-3% є досить актуальним, оскільки інвестиції у підвищення ККД швидко окуплюються за рахунок зниження експлуатаційних витрат через зменшення споживання електроенергії. В середньому вартість реалізації можливості енергозбереження стосовно підвищення ККД на 1% становить приблизно 10% вартості самого двигуна [5].

Енергоефективність АД також залежить від умов його експлуатації. До них належать температура довкілля, вологість, тиск, вібрації, удари тощо. Як наслідок, у двигунів можливі руйнування окремих елементів і спаїв, порушення контактів, замикання проводів з ушкодженою ізоляцією, самовідгвинчування болтів, гайок тощо. Найнебезпечнішим є механічний резонанс, який часто призводить до руйнування конструкції.

АД, що випускаються, можуть мати енергетичні й технічні характеристики, які в гіршу сторону відрізняються від паспортних даних внаслідок використання неякісних матеріалів та вибіркового контролю якості двигунів, значних допусків на їх технічні параметри.

Важливим фактором впливу на рівень енергоефективності АД є якість його обслуговування та ремонту. Проведення ремонтів після відмови двигуна, вимушена заміна його деталей та елементів є економічно невиправданими через значні витрати. За технологічними показниками якість ремонту двигунів не відповідає рівню технології їх виробництва [6].

Характеристики відремонтованих АД істотно відрізняються від щойно випущених виробником через те, що в результаті експлуатації та ремонту змінюються характеристики конструкційних матеріалів. Відбувається насичення сталі та зростання струму намагнічування, який стає несинусоїдальним, оскільки містить крім першої також непарні гармоніки 5,7,11... порядків. Зменшення під час ремонту АД кількості витків на 10% призводить до різкого підвищення густини магнітного потоку у сталі статора, і струм холостого ходу збільшується до 25%, а ККД й коефіцієнт потужності знижуються [1].

**Матеріали і результати досліджень.** Механічне навантаження, відхилення, несиметрія та несинусоїдальність напруги, відхилення частоти – найбільш значимі фактори зниження рівня енергоефективності ЕМС з АД. Для дослідження впливу цих факторів на енергетичні характеристики ЕМС з АД було проведено математичне моделювання. З використанням моделі діагностування енергоефективності [7] в середовищі MATLAB побудовано енергетичні характеристики АД серії 5А типу 6А315LA4 ( $P_H = 160$  кВт,  $n_H = 1485$  об/хв,  $U_H = 380$ В,  $I_H = 272$ А,  $\eta_H = 95,3\%$ ,  $\cos\phi_H = 0,89$ ) у залежності від зміни величини коефіцієнта завантаження та ПЯЕ. У процесі комп'ютерного моделювання значення напруг та струмів формувалися як реальні сигнали від вимірювального пристрою.

Величина коефіцієнта завантаження варіювалась у бік збільшення (рис. 1). Характерним є пропорційне зростання активної і повної потужності за незначного збільшення реактивної. В діапазоні  $K_3 > 1$  значення коефіцієнта потужності  $\cos\phi_H$  зростає в незначній мірі. Також спостерігається зростання повних втрат за рахунок збільшення змінних та доданих. За низьких значень коефіцієнта завантаження ККД двигуна зменшується на 5...7%, а  $\cos\phi$  - на 20...30%.

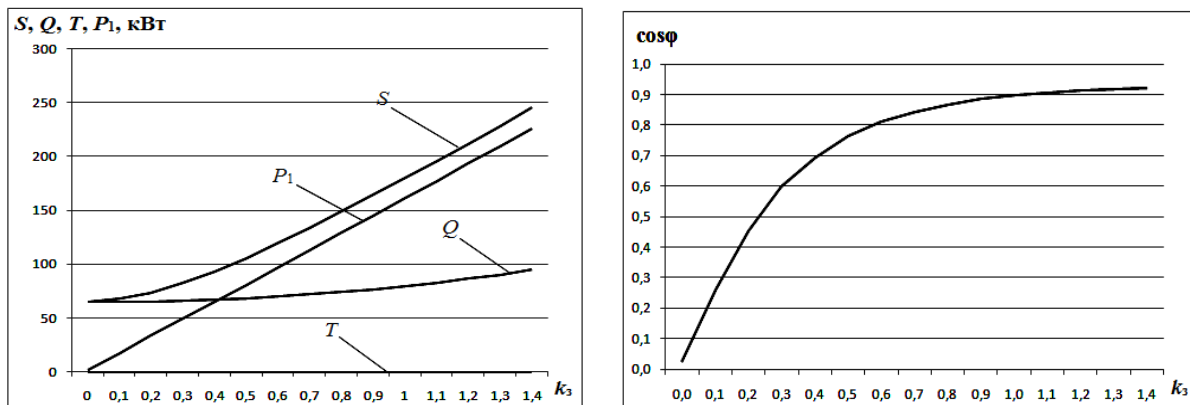


Рисунок 1 – Залежності параметрів АД від коефіцієнта завантаження  $k_3$ : а - процесу енергоспоживання ( $P_1, Q, S, \cos\phi$ ); б - процесу енерговикористання ( $\Delta P_2, V, K, \Delta P_1, \eta$ )

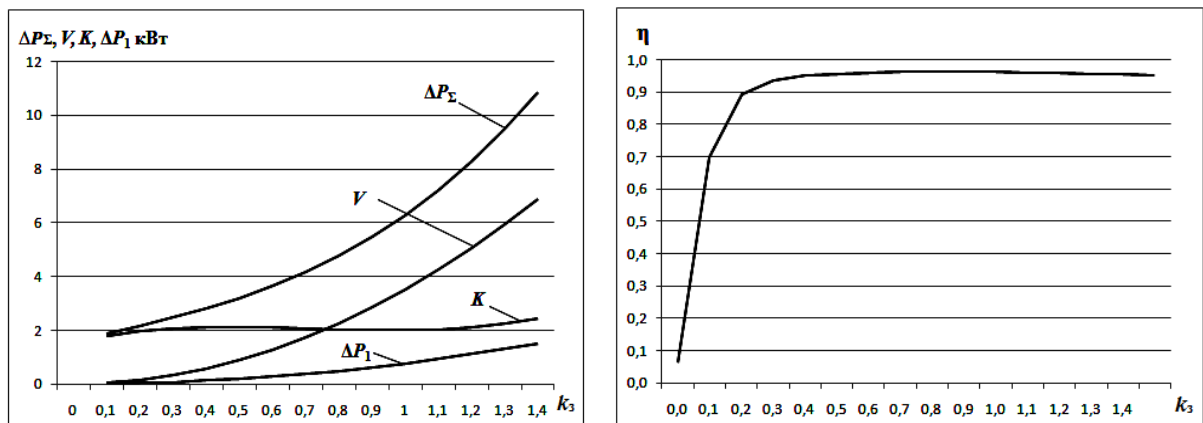


Рисунок 1 (продовження) – Залежності параметрів АД від коефіцієнта завантаження  $k_3$ : а - процесу енергоспоживання ( $P_1, Q, S, \cos\phi$ ); б - процесу енерговикористання ( $\Delta P_\Sigma, V, K, \Delta P_1, \eta$ )

ГОСТ 13109-97 встановлює на затискачах електропривода нормально і гранично припустиме усталене відхилення напруги  $\delta U_y = \pm 5\%$  і граничне  $\pm 10\%$  номінальної напруги мережі. Як видно з графіків рис. 2, у випадку зниження напруги на двигуні відносно номінальної, реактивна потужність зменшується (на 10% при зниженні напруги на 10%).

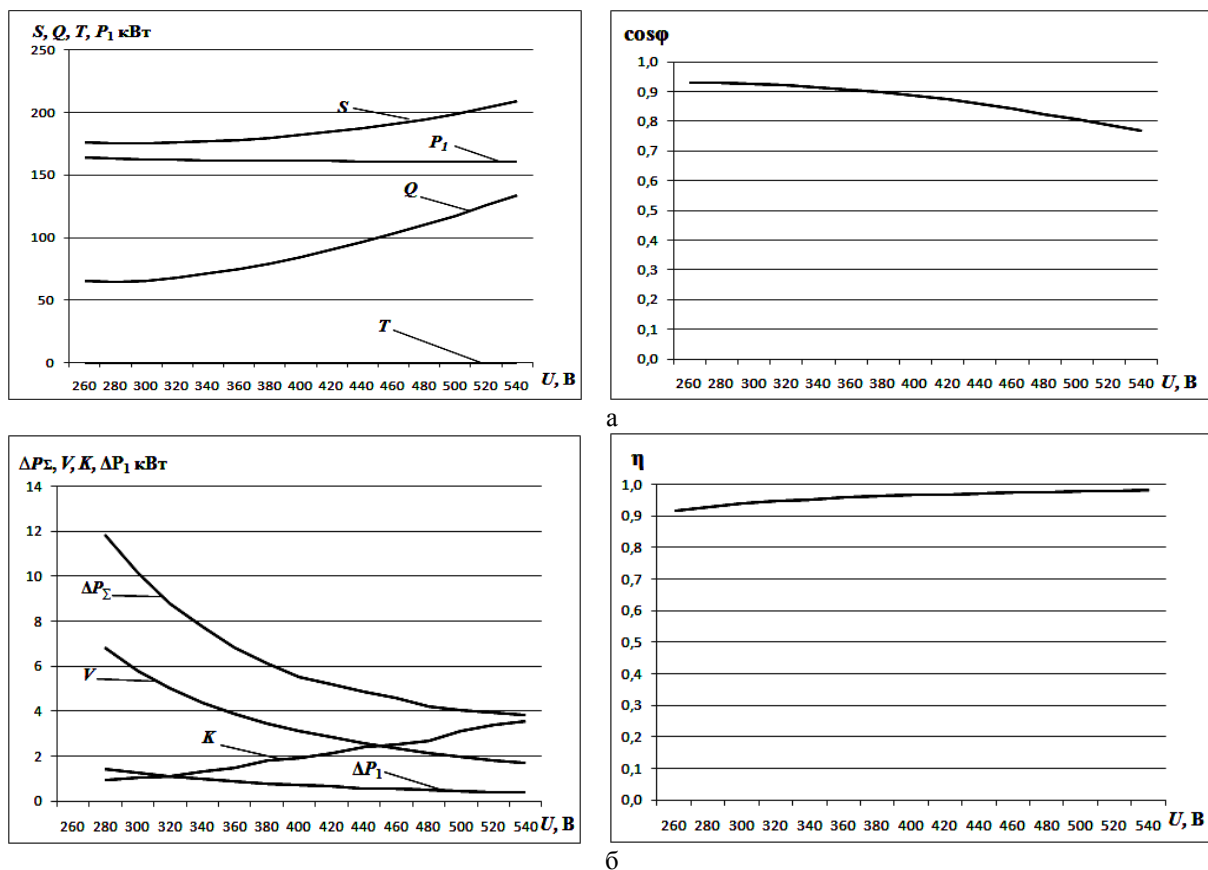


Рисунок 2 – Залежності параметрів АД від відхилення напруги від номінальної для номінального навантаження: а - процесу енергоспоживання ( $P_1, Q, S, \cos\phi$ ); б - процесу енерговикористання ( $\Delta P_\Sigma, V, K, \Delta P_1, \eta$ )

За умови споживання тієї самої потужності зростає струм двигуна (при зниженні напруги на 10% струм статора збільшується на 10%, струм ротора - на 14%, рис. 3). Зростають нагріваючі втрати, що призводить до перегрівання ізоляції, її старіння і, як наслідок, до збитків, зумовлених скороченням терміну служби ЕМС з АД.

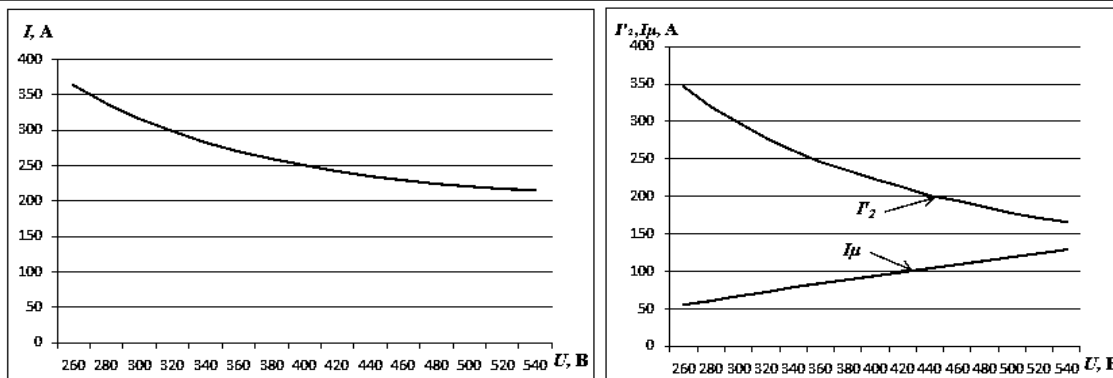


Рисунок 3 – Залежність середнього діючого значення струму, приведенного струму ротора, струму намагнічування АД від відхилення напруги від номінальної

Підвищення напруги на двигуні призводить до збільшення споживаної ним реактивної потужності й зниження коефіцієнта потужності (на 3% при збільшенні напруги на 10%), 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.

Параметри процесу енерговикористання зі зростанням напруги покращуються (зменшується струм на 7%), нагріваючі втрати, і дещо збільшується ККД), тому з точки зору нагрівання двигуна більш небезпечними є негативні відхилення напруги.

Відповідно до ГОСТ 13109-97 нормально і гранично припустимі відхилення частоти  $\Delta f$  складають  $\pm 0,2$  і  $\pm 0,4$  Гц. Причиною відхилення частоти може бути зміна балансу активної потужності. З графіків рис. 4 видно, що при зниженні частоти на двигуні відносно номінальної на 5% для номінальних напруги і навантаження зростає споживана ним реактивна потужність на 2,4%, і відповідно знижується коефіцієнт потужності. Струм ротора змінюється пропорційно частоті (рис. 5). 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 [8].

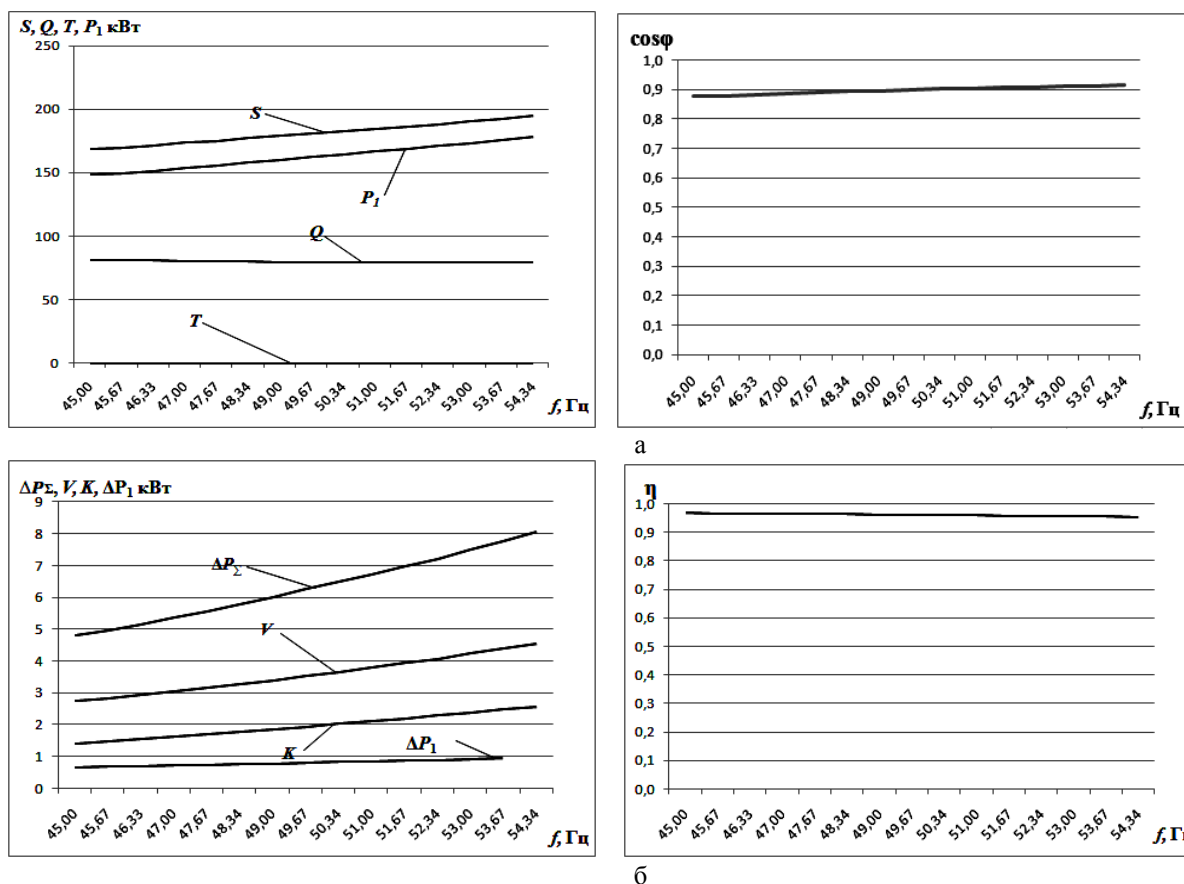


Рисунок 4 – Залежності параметрів АД від відхилення частоти мережі від номінальної:  
 а - процесу енергоспоживання ( $P_1, Q, S, \cos\varphi$ ); б - процесу енерговикористання ( $\Delta P_{\Sigma}, V, K, \Delta P_1, \eta$ )

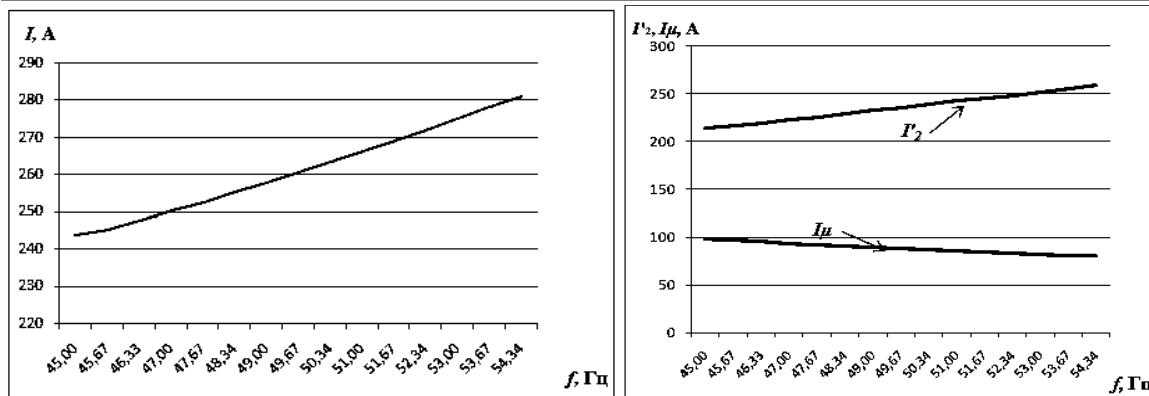


Рисунок 5 – Залежність середнього діючого значення струму, приведенного струму ротора, струму намагнічування АД від відхилення частоти мережі від номінальної

Зростання частоти на 4% збільшує коефіцієнт потужності на 1,3% і 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%.

Відповідно до ГОСТ 13109-97 нормально і гранично допустиме значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  для мережі 0,38 кВ становлять 8% і 12%. Як видно з графіків рис. 6, зі збільшенням коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  зростає повна потужність за рахунок появи потужності спотворення та зменшується коефіцієнт потужності. У випадку  $K_U = 7\%$  потужність спотворення дорівнює 25,7кВт, тобто 16% від активної, а коефіцієнт потужності знижується більше ніж на 8%.

Сумарні втрати також зростають на 10% за рахунок збільшення додаткових втрат від несинусоїдальності напруги. Втрати мають найбільше значення на частотах вищих гармонік низьких порядків, у першу чергу третього, п'ятого і сьомого. 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 [4]. Якщо амплітуди 5-ї і 7-ї гармонік напруги складають відповідно 20 і 15% амплітуди 1-ї гармоніки, коефіцієнт потужності двигуна зменшується на 2,6%.

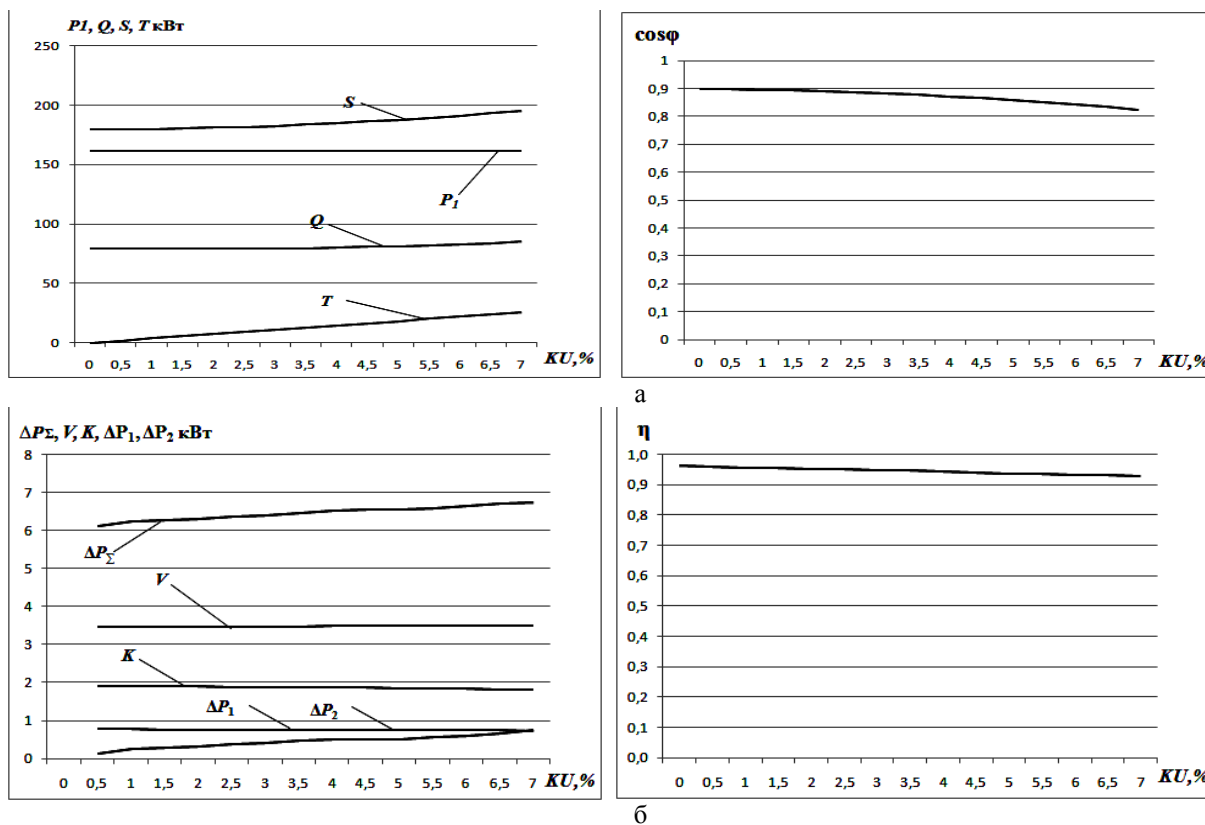


Рисунок 6 – Залежності параметрів АД від несинусоїдальності напруги: а - процесу енергоспоживання ( $P_1, Q, S, \cos\varphi$ ); б - процесу енерговикористання ( $\Delta P_\Sigma, V, K, \Delta P_1, \eta$ )

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. 7 видно, що збільшення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності  $K_{2U}$  призводить до збільшення споживання активної і реактивної потужності та зниження коефіцієнта потужності. Також значно зростають втрати потужності ( $K_{2U} = 2\%$  - на 10%,  $K_{2U} = 4\%$  - на 25%) і відповідно знижується ККД.

Опір зворотної послідовності АД приблизно дорівнює опору загальмованого двигуна, а отже в 5 - 8 разів менший опору прямої послідовності [9]. 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 [4]. Щоб уникнути додаткового нагрівання, навантаження двигуна повинно бути знижено. Згідно рекомендації ІЕС-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%.

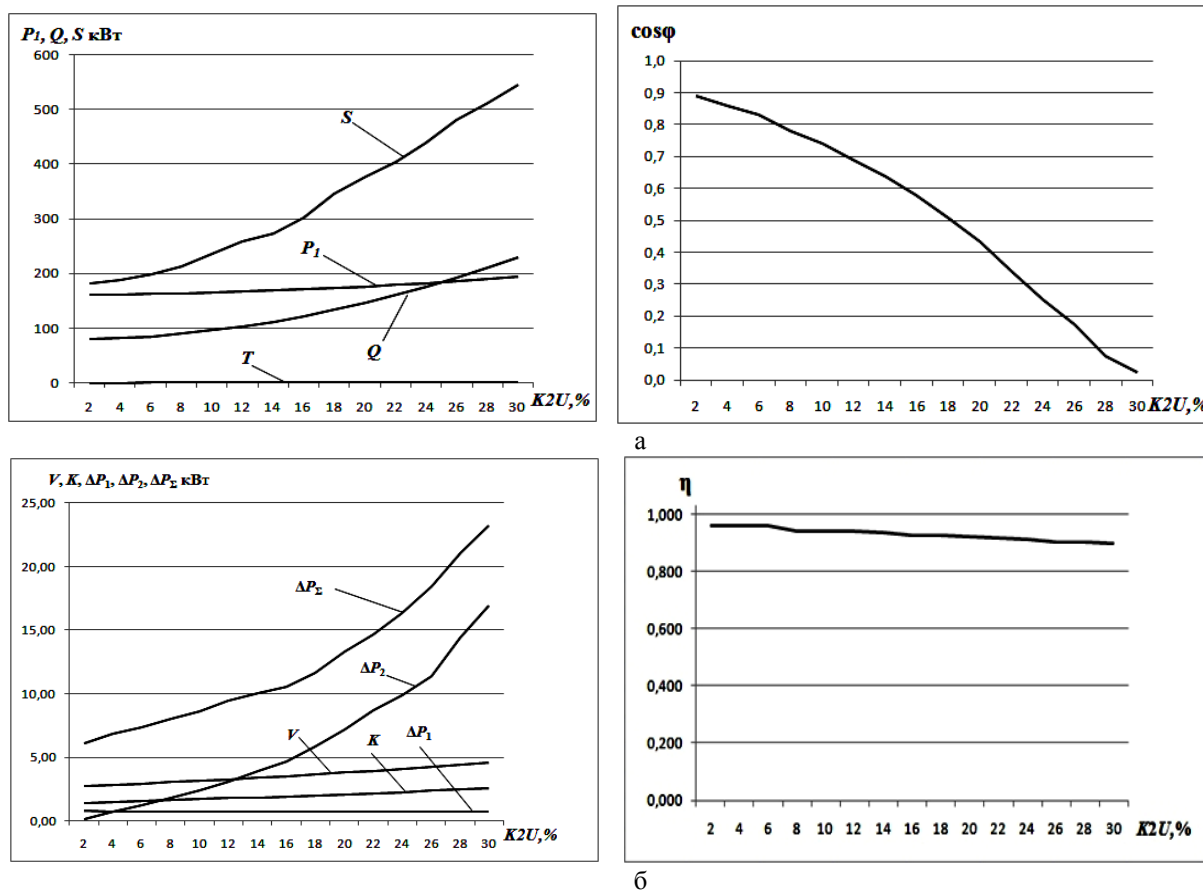


Рисунок 7 – Залежності параметрів АД від несиметрії напруги:

а - процесу енергоспоживання ( $P_1, Q, S, \cos\phi$ ); б - процесу енерговикористання ( $\Delta P_2, V, K, \Delta P_1, \eta$ )

**Висновки.** Аналізування факторів впливу на енергоефективність ЕМС показало, що основними експлуатаційними чинниками є якість напруги живлення та режим навантаження. Проведені дослідження впливу зниження якості напруги живлення та величини навантаження на енергетичні характеристики ЕМС з АД доводять, що відхилення вказаних факторів від припустимих призводить до значного погіршення енергетичного й технічного стану та зменшення ресурсу роботи. Ефективна експлуатація при таких умовах можлива при використанні сучасних методів регулювання якості електроенергії з застосуванням новітніх силових електронних компонентів та підвищенні завантаження робочих машин.

#### Список літератури

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – Киев: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.
2. Закладний О.М. Сучасні методи регулювання якості електроенергії / Закладний О.М., Закладний О.О./ Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. 2007. №2. С. 25-30.



3. И. Я. Браславский. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З.И. Ишматов, В.Н. Поляков. – Москва, Асадема 2004, 256 с.
4. Закладний О.М. Электропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. –К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316 с
5. П.В. Тютеева Оценка стоимости асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения / П.В. Тютеева, О.О. Муравлева // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4, с.183-186
6. Д.И. Родькин. Системы динамического нагружения и двагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д.И. Родькин – М.: недра, 1992. – 236 с.
7. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода. Энергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №1, с. 79-84.
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.
9. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.

**О.О. Zakladnyi, E.G. Bryzhitskyi**

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»**

#### **RESEARCH IMPACTS ON ENERGY PERFORMANCE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS**

*The paper analyzes the factors influencing the energy efficiency of electromechanical systems: quality voltage mode load operating conditions; quality manufacturing, maintenance and repair; active and quality construction materials. The critical effect in actual use causes the quality of the supply voltage and load mode. Using mathematical modeling showed that the variances of quality indices of electricity, exceeding the normalized standard value, normal operation of electromechanical systems, or even impossible, or may be provided only significant decrease in load. A significant reduction in energy electromechanical systems occurs even when the quality of electricity vary within the permissible standard values.*

*Keywords:* energy efficiency, electromechanical system, the quality of the supply voltage, load mode.

#### **References**

1. Ermolaev S.A. Operation of power in agriculture / S.A. Ermolaev, E.P. Masyutkyn, V.F. Yakovlev. – Kiev: Fyrma “Ynkos”, 2005. – 670 p.
2. Zakladnyi O.M. Modern methods of regulating power quality / Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O./ Informatsiynny zbirnyk «Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika» Promelektro. 2007. #2. P. 25-30.
3. Y. Ya. Braslavskyy. Energy-saving asynchronous electric drive/ Y. Ya. Braslavskyy, Z.Y. Yshmatov, V.N. Polyakov. – Moskva, Academa 2004, 256 p.
4. Zakladnyi O.M. Electric drive: teach. guidance / O.M. Zakladnyi, V.V. Prokopenko, O.O. Zakladnyi. – К.: NTUU «КПИ», 2007. – 316 p.
5. P.V. Tyuteva. Valuation of asynchronous motors when changing the cross-sectional geometry / P.V. Tyuteva, O.O. Muravleva // Yzvestyua Tomskoho polytekhnycheskoho unyversyteta. 2010. V. 316. # 4, p.183-186
6. D.Y. Rod'kyn. Systems of dynamic loading and diagnostics of electric motors with post-repair tests / D.Y. Rod'kyn – М.: Nedra, 1992. – 236 p.
7. Zakladnyi O.O. Methods of functional diagnostics asynchronous electric energy. Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2013. #1, p. 79-84.
8. Syromyatnykov Y.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / Y.A. Syromyatnykov; edited by L.H. Mamykonyantsa. – 4th ed. revised and enlarged. – М.: Energoatomisdat, 1984. – 240 p.
9. Shydlovskyy A.K. Improving power quality in electrical networks / A.K. Shydlovskyy, V.H. Kuznetsov – Kiev: Nauk. dumka, 1985. – 268 p.

**УДК 621.311.001.57 (063)**

**О.А. Закладной, канд. техн. наук, доцент; Е.Г. Брижицкий, студент**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

#### **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*В статье проанализированы факторы, влияющие на энергетическую эффективность электромеханических систем: качество напряжения питания, режим нагрузки, условия эксплуатации; качество изготовления, технического обслуживания и ремонтов; качество активных и конструкционных материалов. Критическое влияние в реальных условиях эксплуатации оказывает качество напряжения питания и режим нагрузки. С помощью математического моделирования показано, что при отклонениях*

*показателей качества электрической энергии, превышающих нормируемые стандартами значения, нормальная работа электромеханических систем или вообще невозможна, или может быть обеспечена только в случае значительного уменьшения нагрузки. Существенное снижение энергоэффективности электромеханических систем имеет место даже в случае, когда показатели качества электрической энергии меняются в пределах допустимых стандартами значений.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, электромеханическая система, качество напряжения питания, режим нагрузки.

Надійшла 24.02.2016

Received 24.02.2016

УДК 621.311.1:621.9.263:681.51/54

А.В. Мейта, канд. техн. наук,

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРНОГО ПОЛЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

*В работе рассматривается факторное поле шаровой мельницы, которое позволяет выделить основные факторы определяющие работу измельчающих агрегатов для создания на его основе нейросетевой модели элементов дробильно-помольного комплекса. Показано, что объект автоматического регулирования типа «мельница» математически описывается инерционным звеном первого порядка с учетом транспортного запаздывания. Показано, что построение управляющей нейронной сети целесообразно не только для всего комплекса в целом, но и для отдельных его элементов (этапов).*

**Ключевые слова:** Факторное поле, нейросетевая модель, измельчение, шаровая мельница.

**Вступление.** Математическое моделирование позволяет количественно рассчитать оптимальные параметры процессов и аппаратов и определить пути и методы совершенствования техники и технологии производства. Математическая модель описывает реальный объект с некоторым приближением. Степень соответствия описания реальному процессу определяется, прежде всего, полнотой учета возмущающих воздействий. При отсутствии или незначительности возмущений можно однозначно определить влияния входных и управляющих параметров на выходные.

Задачи оптимизации процесса и параметров аппарата являются, как правило, обратными, в которых задаются физические свойства, кинетические константы, константы процесса, постоянные времени, коэффициенты модели в динамическом описании объекта. Обратные модели позволяют определить значения входных параметров и других заданных или оптимальных начальных свойств обрабатываемых веществ, а также установить допустимые отклонения режимов обработки. Обратными моделями. Для их решения математические описания приводят к виду, пригодному для поиска оптимального решения одним из известных методов.

Объективная модель измельчающего объекта может быть создана при условии хорошей осведомленности о свойствах изучаемого объекта. По степени полноты информации об объекте и процессах, происходящих внутри их, элементы дробильно-помольного комплекса относятся к объектам с нулевым уровнем информации. В данном случае объект представляется как «черный ящик», а его математическая модель строится путем статистических испытаний реального объекта на основе регрессионного, дисперсного и корреляционного анализов и факторного планирования эксперимента [1]. Поэтому для создания более информативной модели процесса дробления необходимо рассмотреть физическую сторону процесса разрушения вещества в измельчающих агрегатах и факторы, его определяющие.

**Цель и задачи исследования.** Оптимизация энергопотребления желательна на всех стадиях управления процессами помола и дробления и особенно важна для крупных, энергоемких объектов, таких как шаровая мельница. Измельчение сырья в шаровых мельницах является последней стадией уменьшения крупности вещества. Мощность при работе шаровой мельницы расходуется на подъем шаровой загрузки, на сообщение ей кинетической энергии и на преодоление вредных сопротивлений.