

## ЗАСОБИ ДІАГНОСТИЧНОГО АУДИТУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЯК ЕЛЕМЕНТ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

*Відповідно до європейських директив і стандартів стосовно підвищення рівня енергоефективності відоме твердження енергоменеджменту – «Не можеш вимірювати – не можеш керувати» – означає, що визначення енергетичних індикаторів є основою енергетичного менеджменту. Таким чином, засоби діагностичного аудиту, які забезпечують контроль рівня енергетичної ефективності споживачів шляхом моніторингу енергетичних індикаторів, є необхідним елементом сучасної системи енергетичного менеджменту. Такі засоби, розроблені відповідно до принципів сучасних smart-технологій, дозволяють реалізувати на підприємстві систему енергоменеджменту відповідно до стандарту ISO 50001:2011.*

**Ключові слова:** система енергетичного менеджменту, рівень енергетичної ефективності, енергоаналіз, електромеханічна система

**Вступ.** Після фінансової кризи в світовій економіці відбулися кардинальні зміни – замість володіння енергоресурсами домінуюче місце займають технології ефективного використання енергоресурсів та альтернативних джерел енергії. Змінилась парадигма конкурентного світу: від суспільства споживання – до сталого розвитку. В цих умовах зростає роль енергетичного менеджменту як інструменту досягнення високого рівня енергетичної ефективності на підприємстві.

У 2011 році запроваджено міжнародний стандарт ISO 50001 “Energy management systems – Requirements with guidance for use”, який встановлює вимоги до розроблення, впровадження, підтримання та покращення системи енергетичного менеджменту для досягнення постійного поліпшення ситуації у галузі енергозбереження.

**Аналіз попередніх досліджень.** Відповідно до стандарту ISO 50001:2011 використовується принцип керування якістю – цикл Шухарта-Демінга – «Plan-Do-Check-Act» («планування, дія, перевірка, коригування»), що дозволяє ефективно керувати енергоспоживанням на системній основі та постійно вдосконалювати роботу з енергетичного менеджменту. Використання засобів діагностичного аудиту енергоефективності дозволить впровадити сучасні інформаційні smart-технології у систему енергетичного менеджменту підприємства та автоматизувати виконання таких складових стандарту ISO 50001:2011, як встановлення енергетичної базової лінії, індикаторів енергоефективності, здійснення моніторингу та необхідних вимірювань для визначення рівня енергоефективності, проведення енергоаналізу, енергопланування та формування технічних звітів тощо.

Найбільший вплив на раціональне використання електроенергії підприємством спричиняє енергоефективність електромеханічної системи (ЕМС) як основного споживача. У проектуванні технологічного процесу, під час вибору ЕМС зазвичай не приділяється уваги її енергоефективності протягом усього строку служби. Але повинні розглядатися не просто режим завантаження ЕМС і не лише його робочі характеристики та енергоефективність на даний момент – слід здійснювати оцінювання економічності за весь строк служби. Енергоефективність ЕМС на сьогодні оцінюється аперіодично, наприклад, під час проведення енергетичного аудиту. Тому актуальним завданням є безперервний постійний контроль споживання електроенергії ЕМС шляхом діагностичного аудиту її енергоефективності як складова системи енергетичного менеджменту на підприємстві, відповідно до вимог ISO 50001:2011 [1, 2].

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 окрема технологічна лінія. Контроль конкретного обладнання, наприклад, ЕМС, 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 набув нових рис, а саме, – він став поширюватися на кінцевого споживача. Це є новим стандартом у методології енергетичного менеджменту – запроваджується високий ступінь деталізації, контроль енергетичної ефективності ЕМС і, відповідно, – оперативне реагування на погіршення енергоефективності. Ці зміни пов’язані з постійним здорожчанням електричної енергії, коли основна складова вартості життєвого циклу ЕМС – витрати на електричну енергію – становлять в середньому 85 % від усіх витрат за термін експлуатації [3].

**Метою роботи** є розроблення принципів діагностичного аудиту енергетичної ефективності ЕМС, які базуються на глобальному стандарті ISO 50001:2011 та дозволять сформувати якісну систему енергетичного менеджменту.

**Матеріали і результати досліджень.** В результаті багатьох чинників, зокрема таких, як робота ЕМС з недовантаженням, неякісна мережа живлення, недостатнє технічне обслуговування, нерациональне керування технологічним процесом, впливу випадкових факторів – реальне споживання енергії завжди відрізняється від ідеального. Контроль та оцінка вказаних розходжень між розрахунковим (планованим) та фактичним споживанням енергії і є головним завданням діагностичного аудиту енергоефективності ЕМС. Сам собою контроль не економить енергію, але з його допомогою енергетичний менеджер може визначити, де і коли слід вжити коригуючих дій для усунення неефективного її використання. Такий підхід дозволяє оцінювати стан ЕМС на всіх етапах її життєвого циклу – від введення в експлуатацію до списання.

Використання засобів діагностичного аудиту енергоефективності ЕМС як технічного інструменту стандарту ISO 50001:2011 спрощує включення енергоменеджменту до інтегрованої системи менеджменту з підвищення якості та безпеки продукції, екологічного менеджменту та менеджменту професійної безпеки і здоров'я персоналу.

Для оцінювання енергоефективності ЕМС застосовуються енергетичні критерії – енергія, яка споживається з мережі за цикл роботи, питомі витрати енергії на одиницю продукції та сумарні втрати енергії. В деяких випадках застосовуються критерій максимального ККД, оптимального імпедансу тощо. Однак не існує загальноприйнятого критерію енергоефективної роботи ЕМС [2].

Оцінювання енергоефективності ЕМС є комплексним завданням з великою кількістю характеристик і факторів, які на неї впливають (навантаження, якість живильної напруги, технічний стан тощо). Основним показником ефективності роботи в енергетичному аспекті вважається ККД системи в цілому. Однак для комплексної оцінки енергоефективності важливі також коефіцієнт потужності, електроенергія, яка споживається протягом життєвого циклу, і значення складових втрат.

Процес ефективного використання енергії ЕМС визначається двома основними складниками: енергоспоживання та енерговикористання (перетворення) спожитої енергії, що відповідає концептуальному представленню терміну «рівень енергоефективності» у стандарті ISO 50001:2011.

Авторами запропоновано використовувати показники енергоефективності – ККД та коефіцієнт потужності для визначення енергетичного і технічного стану ЕМС з урахуванням режиму навантаження та якості напруги живлення. Визначення стану ЕМС здійснюється порівнянням фактичних параметрів з їх еталонними значеннями, тобто, шляхом аналізування та порівняння індикаторів енергоефективності з енергетичною базовою лінією (рис. 1). Відповідно до ISO 50001:2011 ця процедура є складовою енергоаналізу – визначення рівня енергоефективності на основі вимірюваних даних та довідкової (паспортної) інформації, що дозволить визначити можливості його підвищення. Алгоритм діагностичного аудиту енергоефективності повністю відповідає процедурі енергоаналізу, яка записана у стандарті ISO 50001:2001.

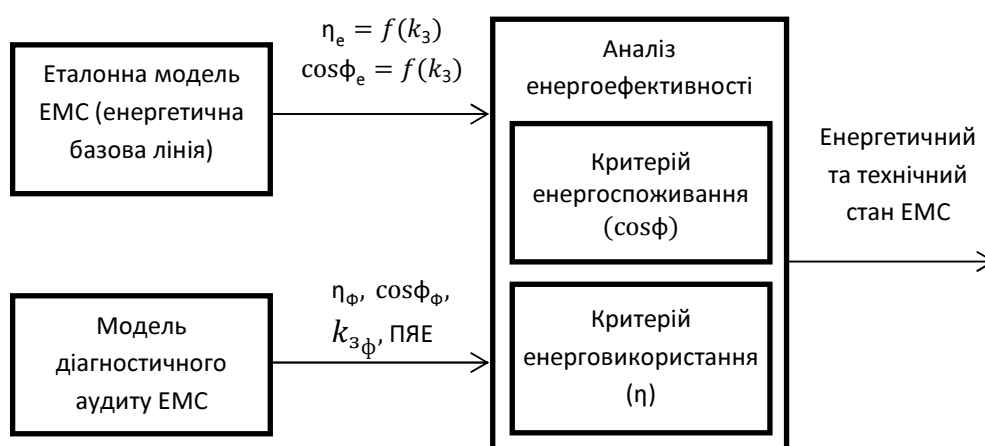


Рис. 1 Визначення енергоефективності ЕМС

Однією з причин зниження рівня енергоефективності ЕМС з асинхронним двигуном (АД) є низька якість напруги живлення. ККД знижується через додаткові втрати потужності від несиметрії і несинусоїдальності напруги

$$\eta' = \frac{P}{P + K + V_1 + V_2 + \Delta P_{1H} k_{3I}^2 + \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}}$$

де  $\eta'$  - ККД за умови неякісної напруги живлення.

Зниження ККД за рахунок неякісної напруги живлення  $\Delta\eta_u$  і незадовільного технічного стану  $\Delta\eta_T$  ЕМС з АД відповідно

$$\Delta\eta_u = \eta_e - \eta', \Delta\eta_T = \eta_{\min} - \eta_\phi.$$

Важливим є врахування впливу несиметрії напруги на потужність двигуна ЕМС. Коефіцієнт завантаження  $k'_3$ , який враховує зниження рівня номінальної потужності двигуна  $P'_H$  від несиметрії напруги живлення,

$$k'_3 = \frac{P}{P'_H} = \frac{100P}{P_H(100 - k_{2U}^2)} = \frac{100k_3}{100 - k_{2U}^2}.$$

Умови визначення енергоефективної роботи ЕМС з АД відповідно до вимог державних стандартів

$$\begin{cases} \eta_e(k_3) - 0,15(1 - \eta_n) \leq \eta_\phi \leq \eta_e(k_3), \\ \cos\varphi_e(k_3) - \frac{1 - \cos\varphi_n}{6} \leq \cos\varphi_\phi \leq \cos\varphi_e(k_3), \\ (0,7 \dots 0,75) \leq k_{3\phi} < 0,9. \end{cases} \quad (3)$$

де  $\eta_e(k_3)$ ,  $\cos\varphi_e(k_3)$  - еталонні (паспортні) характеристики ККД та коефіцієнту потужності;  $\cos\varphi_\phi$ ,  $\eta_\phi$  – фактичні (визначені) значення ККД та коефіцієнту потужності;  $\eta_{\min}$ ,  $k_{3\min}$  – найменші значення ККД та коефіцієнту завантаження для області енергоефективної роботи [3,4].

Еталонні характеристики представлені залежностями  $\eta_e(k_3)$  і  $\cos\varphi_e(k_3)$ , а фактичним значенням ККД і коефіцієнту потужності відповідають точки з координатами  $k_{3\phi}$ ,  $\eta_\phi$  та  $k_{3\phi}$ ,  $\cos\varphi_\phi$  відповідно (рис. 2). В залежності від того, в яку область потрапляє точка з координатами  $k_{3\phi}$ ,  $\eta_\phi$  та  $k_{3\phi}$ ,  $\cos\varphi_\phi$ , робиться висновок про рівень енергоефективності ЕМС з АД. Можливі рівні енергоефективної роботи ЕМС наведено в таблиці 1. Використовуючи залежність  $\cos\varphi_e(k_3)$ , можна отримати подібну таблицю також для процесу енергоспоживання [5].

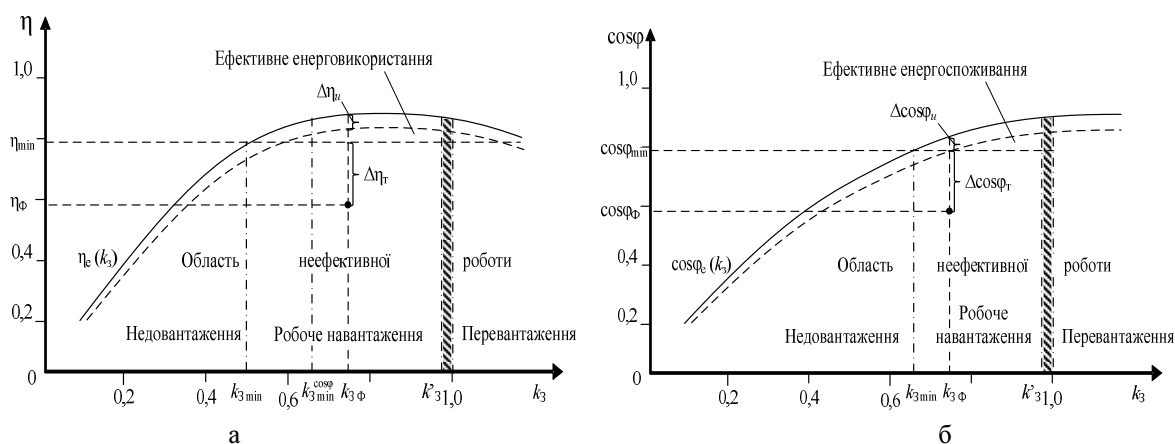


Рис.2 Області ефективного енерговикористання (а) і енергоспоживання (б) ЕМС з АД

Таблиця 1

Рівні енергоефективної роботи ЕМС з АД

Рівень енергоефективності		Області роботи		Висновки
		$\eta$	$k_3$	
Високий		$\eta_\phi \geq \eta_{\min}$	$k_{3\min} \leq k_{3\phi} \leq k'_3$	Ефективне енерговикористання
Низький	Недовантаження	$\eta' \leq \eta_\phi \leq \eta_e$	$k_{3\phi} < k_{3\min}$	Низька якість електроенергії
		$\eta_\phi < \eta'$		Незадовільний технічний стан ЕМС
	Робоче навантаження	$\eta_\phi < \eta_{\min}$	$k_{3\min} \leq k_{3\phi} \leq k'_3$	Незадовільний технічний стан АД
	Перевантаження	$\eta' \leq \eta_\phi \leq \eta_e$	$k_{3\phi} > k'_3$	Низька якість електроенергії
$\eta_\phi < \eta'$		Незадовільний технічний стан ЕМС		

За допомогою комп'ютерного моделювання виконано дослідження роботи насосної установки з АД відповідно до графіка електричного навантаження, експериментально знятого під час енергоаудиту (рис.3). Номінальні дані АД насосної установки:  $P_H = 7,5\text{кВт}$ ,  $n_H=1450\text{об/хв}$ ,  $I_H = 15,3\text{ А}$ ,  $\eta_H = 87,5\%$ ,  $\cos\phi = 0,85$ ,  $\lambda = 2,8$ . Термін служби - 20 000 год. Усталене відхилення напруги - 5%, коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності - 1%, зношення - 11 240 год.

Результати моделювання – еталонні та фактичні характеристики насосної установки – наведено на рис. 3– рис. 8 та в табл.2

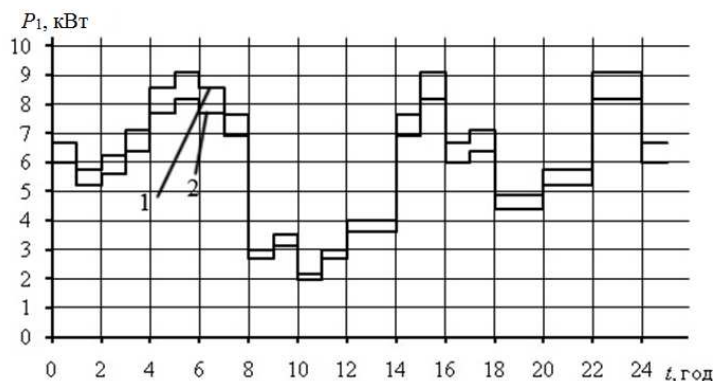


Рис. 3 Графік електричного навантаження насосної установки: 1 – експериментально знятий; 2 – еталонний

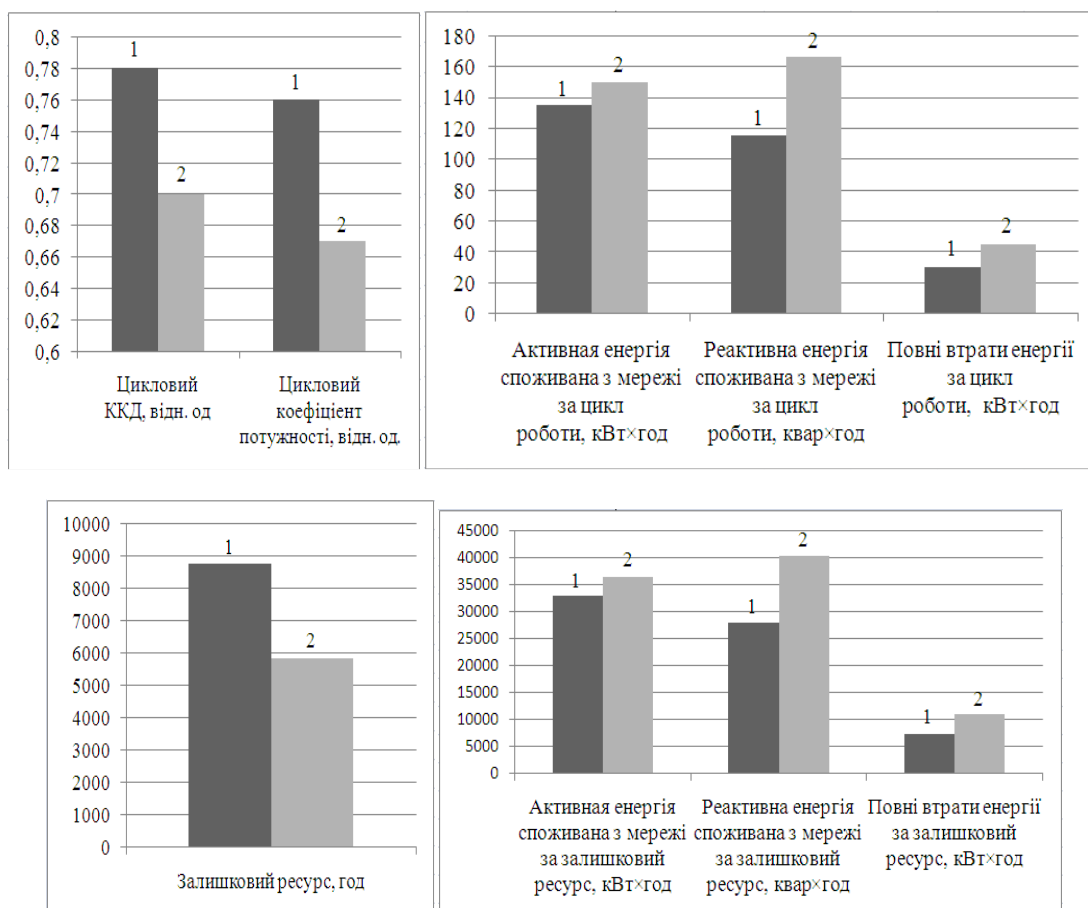


Рис. 4 Результати моделювання параметрів насосної установки: 1 – еталонні значення; 2 – фактичні

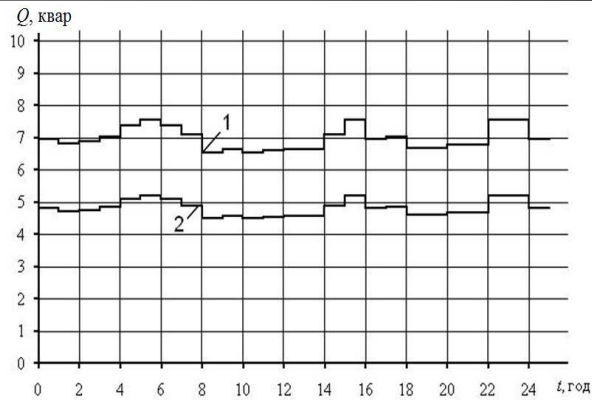


Рис.5 Реактивна потужність насосної установки:  
1 – фактична; 2 – еталонна

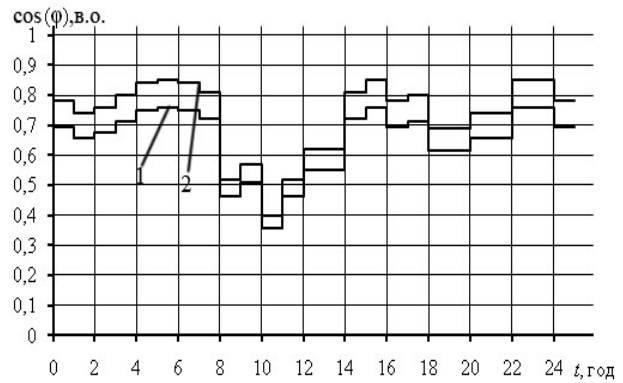


Рис.6 Коефіцієнт потужності насосної установки:  
1 – фактичний; 2 – еталонний

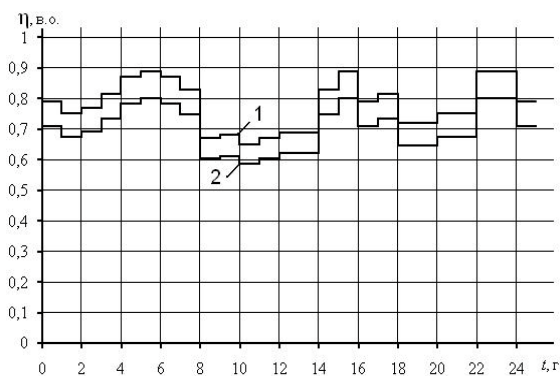


Рис.7 ККД насосної установки: 1 – еталонний; 2 – фактичний

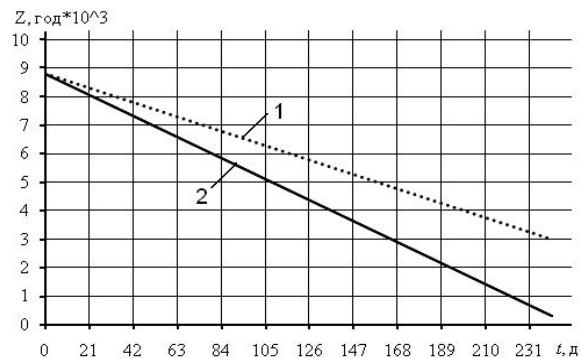


Рис.8 Залишковий ресурс насосної установки:  
1 – еталонний; 2 – фактичний

Таблиця 2

Результати моделювання параметрів насосної установки

Параметр	Еталонні значення	Фактичні значення
ККД циклу, відн. од	0,78	0,7
Цикловий коефіцієнт потужності, відн. од.	0,76	0,67
Залишковий ресурс, год	8760	5840
Активна енергія, що споживається з мережі за цикл роботи, кВт-год	135	150
Реактивна енергія, що споживається з мережі за цикл роботи, квар-год	115	166
Повні втрати енергії за цикл роботи, кВт-год	30	45
Активна енергія споживана з мережі за залишковий ресурс, кВт-год	32940	36600
Реактивна енергія споживана з мережі за залишковий ресурс, квар-год	28060	40504
Повні втрати енергії за залишковий ресурс, кВт-год	7320	10980

Для визначення вартості життєвого циклу необхідно оцінити спожиту електроенергію EMC протягом залишкового ресурсу

$$W_{\text{факт}P} = \frac{Z}{T_y} \int_0^{T_y} P_1(t) dt \approx \frac{Z}{T_y} \sum_{i=1}^n P_{1i} t_i, W_{\text{факт}Q} = \frac{Z}{T_y} \int_0^{T_y} Q(t) dt \approx \frac{Z}{T_y} \sum_{i=1}^n Q_i t_i.$$

У таких умовах роботи (рис. 8) залишковий ресурс АД ЕМС становить 5840 год, а для роботи в номінальному режимі – 8760 год. Відносне зношування становить 1,5, що свідчить про передаварійний режим роботи АД ЕМС.

**Висновки.** Засоби діагностичного аудиту енергоефективності дозволяють впровадити сучасні інформаційні smart-технології у систему енергетичного менеджменту підприємства та автоматизувати виконання таких складових стандарту ISO 50001:2011, як встановлення енергетичної базової лінії, індикаторів енергоефективності, здійснення моніторингу та необхідних вимірювань для визначення рівня енергоефективності, проведення енергоаналізу, енергопланування та формування технічних звітів тощо. Результати моделювання показують, що застосування діагностичного аудиту енергоефективності ЕМС як інструменту системи енергоменеджменту дозволить знизити споживання активної енергії на 10%, реактивної - на 30%, підвищити в 1,5 рази залишковий ресурс до паспортного його значення, ККД - на 8%, коефіцієнт потужності - на 9%, знизити втрати на 33%.

#### Список літератури

1. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода / О.О. Закладний . - Енергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №1. С. 77-82.
2. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О.О. Закладний. – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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, A. Zakladnyi**

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

#### **DIAGNOSTIC TOOLS ENERGY AUDIT AS AN ELEMENT OF CONSTRUCTION ENERGY MANAGEMENT SYSTEM**

*In accordance with European directives and standards to improve the energy efficiency known statement - "You can not measure - you can not manage" - means that the definition of energy is the basis of indicators of energy management . Thus, diagnostic audit tools to ensure control of the level of energy efficiency to consumers through energy monitoring indicators are an essential element of modern energy management system. Such tools developed in accordance with the principles of modern smart- technologies allow to realize the enterprise energy management system in accordance with ISO 50001:2011.*

**Keywords:** energy management system , the level of energy efficiency , energy analysis, electromechanical system.

1. Zakladnyi O.O. 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.  
O.O. Zakladnyy . - Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiya, ekolohiya. 2013. #1. S. 77-82.
2. Zakladnyi O.O. Functional diagnostics efficiency electromechanical systems Monograph / O.O. Zakladnyy. – K.: Vydavnytstvo «Libra», 2013. – 195 s.
3. Prakhovnyk A.V. Diagnosing the efficiency of electromechanical systems as a tool for energy management / A.V. Prakhovnyk, O.M. Zakladnyi, O.O. Zakladnyi // VISNYK Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny «Kyivivs'kyu politekhnichnyy instytut». Seriya «Hirnyctvo»: Zbirnyk naukovykh prats'. – Kyiv: NTUU «KPI»: ZAT «Tekhnovybukh», 2011, - Vyp. 21. S. 121-128.
4. Zakladnyi O.O. Model of energy and conservation standards for functional monitoring of asynchronous electric / O.O. Zakladnyi, O.M. Zakladnyi, I.V. Prytyskach // VISNYK Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny «Kyivivs'kyu politekhnichnyy instytut». Seriya «Hirnyctvo»: Zbirnyk naukovykh prats'. – Kyiv: NTUU «KPI»: ZAT «Tekhnovybukh», 2011, - Vyp. 20. S. 159-166.

5. Zakladnyi O.O. Software functional diagnosis of electromechanical energy systems with induction motors / O.O. Zakladnyy, O.M. Zakladnyy // *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiya, ekolohiya*. 2011. #2. S. 102-108.

УДК 621.311.001.57(063)

**О.А. Закладной, канд. техн. наук; А.Н. Закладной, канд. техн. наук; доцент  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
СРЕДСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО АУДИТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАК ЭЛЕМЕНТ  
ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА**

*В соответствии с европейскими директивами и стандартами по повышению уровня энергоэффективности известно утверждение энергоменеджмента - «Не можешь измерять - не можешь управлять» - означает, что определение энергетических индикаторов является основой энергетического менеджмента. Таким образом, средства диагностического аудита, обеспечивающие контроль уровня энергетической эффективности потребителей путем мониторинга энергетических индикаторов, являются необходимым элементом современной системы энергетического менеджмента. Такие средства, разработанные в соответствии с принципами современных smart-технологий, позволяют реализовать на предприятии систему энергоменеджмента в соответствии со стандартом ISO 50001:2011.*

**Ключевые слова:** система энергетического менеджмента, уровень энергетической эффективности, энергоанализ, электромеханическая система.

Надійшла 17.10.2013

Received 17.10.2013

УДК 621.31

**С.П. Денисюк, д-р. техн. наук, професор; Т.М. Базюк  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

**ОПТИМАЛЬНИЙ ВІДБІР ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

*В статті розглядається можливість підвищення енергоефективності систем електропостачання та оптимізації енергетичних процесів шляхом оптимізації режимів споживання та відбору потужності. Виділено та проаналізовано критерії оптимального відбору потужності. Систематизовано виділені критерії оптимального відбору потужності. Проаналізовано характеристики критеріїв оптимальності. Сформовано систему показників і характеристики для оцінюючих алгоритмів оптимізації та розрахунку систем енергопостачання. Відзначено особливості реалізації компенсаторів реактивної потужності. Наведено алгоритм впровадження компенсаторів реактивної потужності в системі електропостачання. Розглянуто напрями підвищення ефективності споживання шляхом зміни режиму роботи навантаження споживачів.*

**Ключові слова:** нерівномірність споживання, критерії відбору потужності, оптимальний відбір потужності, розосереджена генерація.

**Вступ.** Інтеграція розосереджених джерел енергії в систему енергопостачання створює нові можливості як для електроенергетичних систем, так і для споживачів [1]. Більшість джерел розосередженої генерації характеризуються нестійкими, нестабільними режимами роботи, що вимагає реалізації заходів із зменшення впливу негативних наслідків, підвищення ефективності роботи та підтримання постійної потужності в електричній мережі.

**Мета та завдання.** Для оптимізації енергетичних процесів в системах з пристроями силової електроніки необхідно сформулювати відповідні закони регулювання. Оцінити критерії оптимального споживання та оптимального відбору потужності.