

О.Ф. Соколовський, к.т.н.

Житомирський військовий інститут ім. С.П.Корольова
Державного університету телекомунікацій

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Енергоспоживання насосної установки з регульованим електроприводом визначається витратами мережі та обраним алгоритмом керування, що вимагає проведення ретельного аналізу природи втрат в елементах силового каналу. Для визначення втрат енергії в асинхронному електродвигуні необхідно знати закон зміни струмів двигуна під час перехідного процесу або аналітичний вираз зміни швидкості в часі, а також достовірні дані статорної обмотки у разі зміни її температури. Втрати енергії в насосі можливо визначити за даними вхідної та вихідної потужності. Недоступність окремих параметрів значно ускладнює процедуру ідентифікації енергетичних показників. У роботі проведено дослідження енергетичних процесів, характерних для електромеханічних перетворювачів та відцентрових насосів, на основі параболічних залежностей ковзання від моменту двигуна на робочій ділянці механічної характеристики та залежності втрат напору гідравлічного джерела від продуктивності. Застосування особливостей механічної характеристики асинхронного електродвигуна та напірної характеристики насоса дозволяє вирішити задачу визначення втрат енергії в електромеханічній системі.

Ключові слова: енергетичні показники; насосна установка; електромеханічна система.

Вступ. Зменшення витрат електроенергії під час виконання технологічного процесу є надзвичайно важливим питанням сьогодення. Розвиток насосних установок на сучасному етапі має ряд особливостей, які полягають в інтенсивному підвищенні технологічних вимог до електропривода, розширенні та ускладненні систем керування з метою удосконалення якості регулювання технологічними змінними та покращення енергетичних показників.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найпоширенішим методом керування в насосних установках на даний час є стабілізація напору. Однак сучасні тенденції розвитку систем керування насосними установками передбачають відмову від фіксованого значення тиску з метою отримання максимальної економії під час транспортування рідини. Виробники обладнання в галузі водопостачання запроваджують кардинально нові підходи щодо реалізації схем керування насосними установками [1]. Фірма АВВ розробила інтелектуальну систему керування, в якій споживання енергії мінімізується шляхом керування насосами на найвищій достатній швидкості протягом максимально-можливого проміжку часу [2]. Siemens пропонує ультразвукові регулятори для календарного планування завантаження насосів водопостачання [3]. Компанія UNICO Inc. розробила пакет синтезованих регуляторів (Synthesis IP controller) [4]. Armstrong Pumps Inc. пропонує бездавачевий керований за швидкістю насос [5]. Застосування регульованого електропривода в складі систем автоматичного керування зменшує споживання електроенергії, але вимагає встановлення особливостей взаємовпливу елементів силового каналу на формування втрат потужності в насосній установці.

Постановка завдання. При впровадженні сучасних систем керування насосними установками недостатня увага приділена розробці методів визначення енергетичних показників нового обладнання. **Метою** даної роботи є розробка узагальненого підходу для визначення енергетичних показників електромеханічних систем на основі асинхронних електроприводів з частотним керуванням.

Основна частина. Втрати енергії в двигуні та насосі найбільше впливають на ККД установки.

Втрати потужності в електричному двигуні [6]:

$$\Delta P_{\text{АА}} = P_{\text{const}} + P_{\text{var}}, \quad (1)$$

де P_{const} , P_{var} – сталі та змінні втрати.

Сталі втрати не залежать від навантаження двигуна:

$$P_{\text{const}} = P_{\text{N0}} + P_{\text{IA0}} + P_{\text{CA}}, \quad (2)$$

де P_{N0} – магнітні втрати; P_{IA0} – механічні втрати; P_{CA} – втрати від струму намагнічування.

Змінні втрати залежать від величини струму в обмотках статора і ротора [5]:

$$P_{\text{var}} = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2' = 3(I_2')^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\zeta^2} \right), \quad (3)$$

де R_1 – активний опір обмотки статора; R_2' , I_2' – приведені параметри ротора; $\zeta = I_2'/I_1$.

Звідси:

$$P_{\text{var}} = 3(I'_{2\text{ном}})^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\zeta^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I'_{2\text{ном}}} \right)^2 = P_{\text{var},H} \left(\frac{I_2'}{I'_{2\text{ном}}} \right)^2, \quad (4)$$

де $P_{\text{var},i}$ – номінальні змінні втрати; $I'_{2\text{ном}}$ – номінальний приведений струм ротора.

Повні втрати в електромеханічному перетворювачі:

$$\Delta P_{\text{AA}} = P_{\text{var},i} \left(\vartheta + \left(\frac{I_1}{I_{1\text{н}}}} \right)^2 \right), \quad (5)$$

де $\vartheta = P_{\text{const}}/P_{\text{var},i}$ – коефіцієнт втрат ($\vartheta = 0,5 \div 2$).

Також повні втрати в статичному режимі можна визначити за формулою [7]:

$$\Delta P_{\text{Ad}} = P_{\text{CT},H} \left(a \frac{U^2}{U_H^2} \frac{f_H}{f} + b \frac{U^2}{U_H^2} \right) + P_{M,H} \left(\frac{M_C}{M_H} \right)^2 \left(\frac{U_H}{U} \right)^2 \left(\frac{f}{f_H} \right)^2 + P_{\text{MECH},H} \frac{1-s}{1-s_H} \frac{f}{f_H}, \quad (6)$$

де $P_{\text{NO},i}$, $P_{i,i}$, $P_{\text{AO},i}$ – втрати в сталі, міді та механічні при номінальному режимі роботи; U_i , M_i , f_i , s_i – номінальні напруга статора, момент, частота та ковзання двигуна; $M_{\text{н}}$ – момент опору на валу двигуна; a – коефіцієнт, що враховує частку втрат на гістерезис, b – на вихрові струми ($a+b=1$).

Втрати енергії за час роботи двигуна зі сталим навантаженням за деякий інтервал часу T :

$$\Delta W_{\text{AA}} = \Delta P_{\text{AA}} T. \quad (7)$$

В умовах змінного навантаження:

$$\Delta W_{\text{Ad}} = \int_0^T \Delta P(t) dt = \sum_1^N \Delta P_i t_i, \quad (8)$$

де N – кількість значень навантаження на окремих ділянках.

У перехідних режимах втрати енергії суттєво зростають за той самий час, порівняно з ustalеним режимом при застосуванні нерегульованого електропривода:

$$\Delta W_{\text{AA}} = \int_0^{t_{\text{н}}} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_{\text{н}}} (P_{\text{const}}(t) + P_{\text{var}}(t)) dt = \Delta W_{\text{const}} + \Delta W_{\text{var}}, \quad (9)$$

де ΔW_{const} , ΔW_{var} – втрати енергії, що обумовлені відповідно сталими та змінними втратами потужності.

Звичайно приймають, що сталі втрати не змінюються за час перехідного процесу:

$$\Delta W_{\text{const}} = \int_0^{t_{\text{н}}} P_{\text{const}}(t) dt = P_{\text{const}} t_{\text{н}}. \quad (10)$$

При визначенні інтеграла змінних втрат необхідно знати закон зміни струмів двигуна під час перехідного процесу та мати дані про зміну активних опорів. Більш зручно визначити втрати енергії через механічні величини [6]:

$$\Delta W_{\text{AA}} = \int_0^{t_{\text{н}}} \dot{I}_{\text{н}} (\omega_0 - \omega) dt + J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{н}}^2 - s_{\text{в}}^2), \quad (11)$$

де ω_0 – частота обертання магнітного поля статора; J – сумарний момент інерції.

Якщо прийняти, що момент опору є сталою величиною:

$$\Delta W_{\text{Ad}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нов}}^2 - s_{\text{кин}}^2) + M_C \omega_0 t_{\text{н}} - M_C \int_0^{t_{\text{н}}} \omega dt. \quad (12)$$

Для визначення втрат за (12) необхідно знати аналітичний вираз зміни швидкості в часі. У загальному випадку аналіз енергетичних показників електромеханічних перетворювачів ускладнений через недоступність відповідних параметрів. Втрати енергії з урахуванням параболічного характеру залежності ковзання від електромагнітного моменту на робочій ділянці механічної характеристики двигуна визначимо за формулою:

$$\Delta W_{\text{Ad}i} = M_i t_i \left(\omega_0 \frac{f_i}{f_H} - \Delta \omega_{\text{ном}} \left(\frac{M_i}{M_H} \right)^2 \right) \left(\frac{1}{\eta_{\text{Ad}i}} - 1 \right), \quad (13)$$

де $\Delta \omega_{\text{н}}$ – спад частоти обертання за номінального електромагнітного моменту та номінальної швидкості ротора; \dot{I}_i , $\eta_{\text{Ad}i}$, f_i – електромагнітний момент, ККД двигуна та вихідна частота перетворювача на проміжку часу t_i .

Впорядковану діаграму подачі рідини за інтервал часу \dot{O} можна описати рівнянням [8]:

$$Q = Q_{\delta} \left((1 - \xi) \frac{t}{T} + \xi \right), \quad (14)$$

де Q_{δ} – найбільша продуктивність; ξ – відносна мінімальна подача ($\xi = Q_{\min} / Q_{\delta}$).

Величину втрат енергії у відцентровому насосі через нераціональне перевищення напору за час \dot{O} можна отримати після інтегрування виразу (14) та деяких перетворень [8]:

$$\Delta W_{\dot{A}i} = P_{\delta} T \left(\frac{H_{\dot{n}\dot{o}}^*}{4} \left(\frac{H_{\dot{o}}^*}{H_{\dot{n}\dot{o}}^*} - 1 \right) (1 - \xi)(1 + \xi)^2 \right), \quad (15)$$

де P_{δ} – потужність, що споживається установкою при найбільшій продуктивності; $\dot{I}_{\dot{n}\dot{o}}^*$ – відносне значення статичного напору ($\dot{I}_{\dot{n}\dot{o}}^* = \dot{I}_{\dot{n}\dot{o}} / \dot{I}_{\delta}$; \dot{I}_{δ} – напір, що відповідає найбільшій продуктивності установки та номінальній частоті обертання насосних агрегатів; $\dot{I}_{\dot{o}}^*$ – відносне значення фіктивного напору ($\dot{I}_{\dot{o}}^* = \dot{I}_{\dot{o}} / \dot{I}_{\delta}$).

Системи водопостачання належать до об'єктів із відносно повільними змінами технологічних параметрів. Якщо розглядати роботу на окремих ділянках [8]:

$$\Delta W_{\dot{A}i} = 9,81 \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta H_i t_i}{\eta_{\dot{A}i}}, \quad (16)$$

де Q_i , ΔH_i , $\eta_{\dot{A}i}$ – подача, перевищення напору, ККД насоса на проміжку часу t_i .

У випадку роботи без перевищення напору втрати енергії визначаються лише значенням ККД відцентрового насоса за відповідного напору та продуктивності. Для фіксованих проміжків часу:

$$\Delta W_{\dot{A}i} = 9,81 \cdot Q_i t_i \left(H_0 \left(\frac{f_s}{f_i} \right)^2 - \Delta H_{\dot{m}} \left(\frac{Q_i}{Q_{\dot{m}}} \right)^2 \right) \left(\frac{1}{\eta_{\dot{A}i}} - 1 \right), \quad (17)$$

де H_0 – фіктивний напір насоса за нульової продуктивності та номінальної частоти обертання; $\Delta H_{\dot{m}}$ – втрати напору в насосі за номінальної продуктивності та номінальної частоти обертання; $Q_{\dot{m}}$ – номінальна продуктивність установки. У виразі (17) враховано параболічний характер залежності втрат напору в насосі від продуктивності за відповідної синхронної швидкості двигуна. Слід зазначити, що за фіксованої вихідної частоти перетворювача швидкість робочого колеса зменшується зі зростанням витрат води.

Якщо припустити, що напір та витрати насосних станцій є сталими на певних проміжках часу, можна отримати енергетичні показники елементів силового каналу та електромеханічної системи в цілому:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{\Sigma} t_i = \sum_{i=1}^N (\Delta P_{\dot{A}i} + \Delta P_{\dot{A}i}) t_i, \quad (18)$$

де ΔP_{Σ} – сумарні втрати в насосній установці на відповідних проміжках часу.

З врахуванням властивостей напірної характеристики насоса:

$$\Delta W_{\Sigma} = 9,81 \cdot Q_i t_i \left(H_0 \left(\frac{f_s}{f_i} \right)^2 - \Delta H_{\dot{m}} \left(\frac{Q_i}{Q_{\dot{m}}} \right)^2 \right) \left(\frac{1}{\eta_{\dot{A}i} \eta_{\dot{A}i}} - 1 \right). \quad (19)$$

Сумарні втрати в діючій насосній установці:

$$\Delta W_{\Sigma} = W_{\dot{A}} - 9,81 \cdot \sum_{i=1}^N Q_i t_i \left(H_0 \left(\frac{f_i}{f_i} \right)^2 - \Delta H_{\dot{m}} \left(\frac{Q_i}{Q_{\dot{m}}} \right)^2 \right), \quad (20)$$

де $W_{\dot{A}}$ – покази лічильника активної енергії.

Під час досліджень електромеханічних систем автоматизації насосних установок необхідно враховувати нелінійний характер рівнянь, що описують динаміку системи, математичний опис гідравлічних процесів також є нелінійним. У загальному випадку систему нелінійних диференціальних рівнянь можна записати у векторному вигляді [7]:

$$\dot{x}_n = f(t, x, u), \quad (21)$$

де t – змінна, що визначає час; $x \in R^n$ – вектор змінних стану; $u \in R^m$ – вхідний вектор.

Використовуючи звичайні означення для векторів:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \quad u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_m \end{pmatrix} \quad f(t, x, u) = \begin{pmatrix} f_1(t, x, u) \\ f_2(t, x, u) \\ \dots \\ f_m(t, x, u) \end{pmatrix} \quad (22)$$

Для досліджень побудовано математичну модель насосної установки на основі еквівалентної схеми заміщення, яку отримано при апроксимації параболічних характеристик насоса та гідравлічної мережі в усталеному режимі нелінійними диференціальними рівняннями першого порядку [9]. Структурна схема насосної установки в середовищі Simulink представлена на рисунку 1.

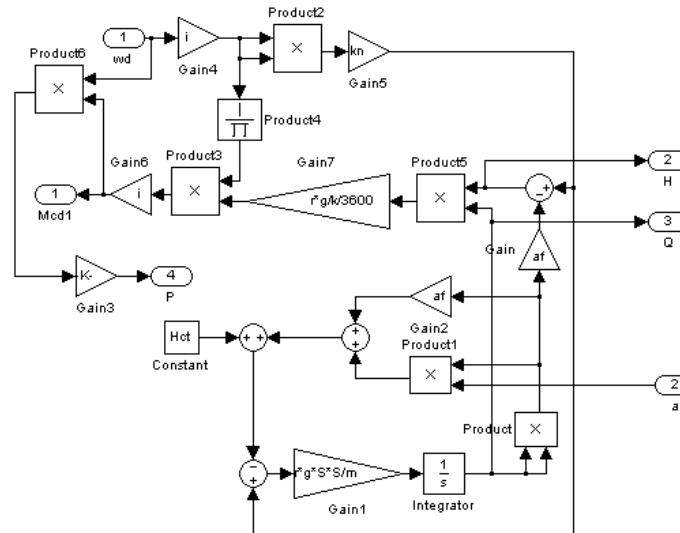


Рис. 1. Математична модель одноагрегатної насосної установки

Під час досліджень використана насосна установка CRE-20-3 фірми Grundfos з вбудованим перетворювачем частоти [10]. Дані установки: $Q_{\bar{m}} = 21 \text{ м}^3/\text{год.}$; $\dot{I}_0 = 43,9 \text{ рад./с.}$; $\Delta H_{\bar{m}} = 9,3 \text{ м.}$; $\eta_{\text{ВНном}} = 0,714$; $P_{\text{Адном}} = 4 \text{ кВт.}$; $\eta_{\text{Адном}} = 0,83$; $\omega_0 = 314 \text{ рад./с.}$; $\Delta\omega_{\bar{m}} = 6,28 \text{ рад./с.}$ Значення статичного напору прийнято на рівні 10 м. Частота обертання робочого колеса насоса змінювалась відповідно до енергозберігаючого алгоритму [11]. Часовий графік синхронної швидкості двигуна та зміни продуктивності насоса у вигляді векторів дискретних значень на десяти кроках квантування алгоритму:

$$\omega_0 = \begin{pmatrix} 314,0 \\ 310,9 \\ 298,3 \\ 307,7 \\ 307,7 \\ 285,7 \\ 266,9 \\ 254,3 \\ 273,2 \\ 248,1 \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 10,0 \\ 8,65 \\ 17,0 \\ 20,7 \\ 18,7 \\ 15,4 \\ 12,9 \\ 19,5 \\ 19,0 \\ 14,9 \end{pmatrix}$$

Втрати потужності, значення ККД в асинхронному двигуні та відцентровому насосі на фіксованих проміжках часу визначалися за допомогою програми WinCAPS [10]. Напірні характеристики насоса у WinCAPS побудовані із врахуванням зміни ковзання двигуна за фіксованої синхронної частоти. На четвертому проміжку споживана потужність установки становить 3,15 кВт, коефіцієнт корисної дії насоса складає 99,86 % відносно номінального значення, струм обмотки статора на 18,4 % менший за номінальну величину. Спад частоти обертання на даній ділянці механічної характеристики – 70 об./хв. Втрати потужності в насосі за продуктивності 20,7 м³/год. та напору – 33 м перевищують втрати в електродвигуні на 38,7 %. Найбільший дисбаланс із процентним співвідношенням 34,35/65,65 між втратами в двигуні і насосі спостерігався на другому проміжку часу. Діапазон відхилень ККД насоса в

процесі дослідження коливався в межах від 0 до -22,41 % щодо номінального. Значення ККД привідного двигуна на десяти проміжках часу перебувало між позначками 80,0–82,8 %.

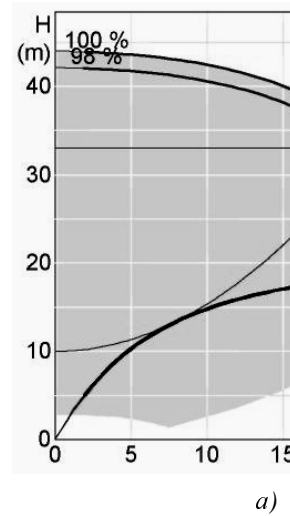


Рис. 2. Визначення

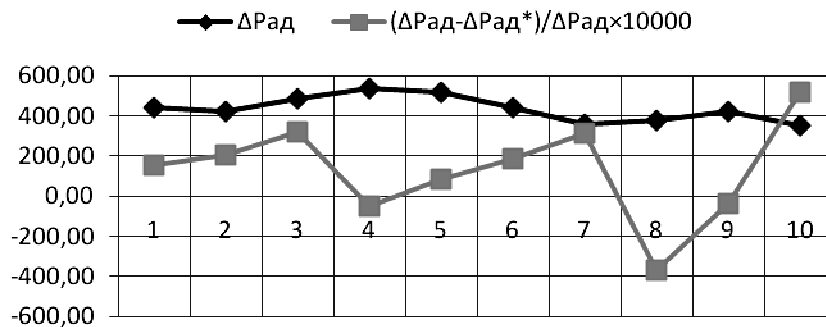


Рис. 3. Графіки втрат потужності в асинхронному електродвигуні

На рисунках 3, 4: $\Delta P_{АА}$, $\Delta P_{АІ}$ – втрати потужності в двигуні і насосі за результатами досліджень; $\Delta P_{АА}^*$, $\Delta P_{АІ}^*$ – результати розрахунків за (13), (17).

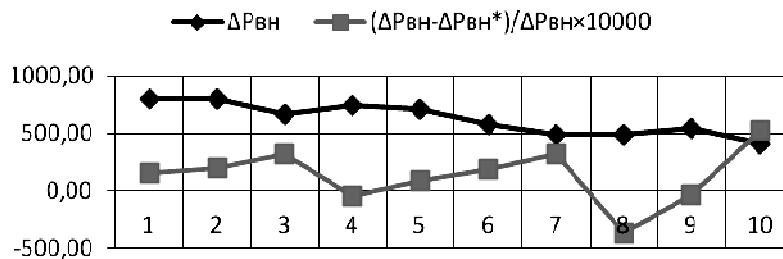


Рис. 4. Графіки втрат потужності у відцентровому насосі

Втрати енергії в асинхронному двигуні на інтервалі часу 100 с склали 121,1 Вт год. Використовуючи (13), отримано розбіжність 0,85 %, яка викликана зміною номінального спаду швидкості в умовах регулювання синхронної частоти. Відмінність між спожитою та вихідною енергією в насосі становила 173,5 Вт год. Похибка результатів досліджень та проведених розрахунків, що обумовлена коливаннями номінального значення втрат напору за різних швидкостей робочого колеса насоса, не перевищила 1,27 %.

Висновок. Дослідження показали, що припущення, прийняті при обчисленні втрат енергії за (13), (17), (19), (20) є допустимими. Зміни номінального ковзання двигуна та номінального значення втрат напору насоса на фіксованих частотах обертання робочого колеса практично не впливають на точність визначення енергетичних показників в елементах силового каналу електромеханічної системи. Важливо зазначити, що у випадку застосування частотного електропривода, коливальні процеси в перехідних режимах не вносять суттєвої похибки на результати досліджень. Зменшення фіксованих проміжків часу

збільшує точність визначення відповідних показників. У діючій насосній установці сумарні втрати можливо визначити за даними лічильника активної енергії, датчика продуктивності та вихідною частотою перетворювача. Застосування запропонованого підходу дозволить зменшити ймовірність зайвих витрат енергії під час впровадження нових способів керування насосною установкою. Подальші дослідження рекомендується направити на визначення впливу окремих елементів силового каналу на ККД електромеханічної системи від обраного методу керування.

Список використаної літератури:

1. *Kiselychnyk O.* Overview of energy efficient control solutions for water supply systems / *O.Kiselychnyk, M.Bodson, H.Werner* // Transactions of Kremenchuk Ostrogradskiy State Polytechnical University. – № 3/2009 (56), Part 1. – Pp. 40–45.
2. Електронний ресурс. – Режим доступу : www.abb.com/motors&drives.
3. Електронний ресурс. – Режим доступу : <http://www.siemens.com/>.
4. Електронний ресурс. – Режим доступу : <http://www.unicous.com/>.
5. Електронний ресурс. – Режим доступу : <http://armstrongfluidtechnology.com/>.
6. *Закладной А.Н.* Энергосбережение средствами промышленного электропривода / *А.Н. Закладной, А.В. Праховник, А.И. Соловей.* – К. : Дія, 2001. – 344 с.
7. *Попович М.Г.,* Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / *М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков.* — К. : Либідь, 2005. — 680 с.
8. *Лезнов Б.С.* Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / *Б.С. Лезнов.* – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
9. *Соколовський О.Ф.* Електромеханічна система автоматизації насосної установки при змішаному з'єднанні агрегатів в умовах енергозберігаючого керування / *О.Ф. Соколовський* // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2013. – Вип. 1 (64). – С. 88–93.
10. Grundfos – WinCAPS версія 2010.01, CD.
11. *Соколовський О.Ф.* Вплив добової нерівномірності споживання води на енергоефективність інтерактивної електромеханічної системи автоматизації насосною установкою / *О.Ф. Соколовський* // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2012. – Вип. IV (63). – С. 112–117.

СОКОЛОВСЬКИЙ Олег Феліксівич – кандидат технічних наук, завідувач кафедри електротехнічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій.

Наукові інтереси:

– енергозбереження в системах автоматизованого електропривода;

– дослідження електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками.

Тел.: (097)578–77–54.

E-mail: of@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 06.11.2014

Соколовський О.Ф. Визначення енергетичних показників насосної установки з регульованим електроприводом

Соколовский О.Ф. Определение энергетических показателей насосной установки с регулируемым электроприводом

Sokolovskyy O.F. Determination of the energy performance of the pumping unit with adjustable electric drive

УДК 62-83:628.12

Определение энергетических показателей насосной установки с регулируемым электроприводом / О.Ф. Соколовский

Энергопотребление насосной установки с регулируемым электроприводом определяется расходом сети и избранным алгоритмом управления, что требует проведения тщательного анализа природы потерь в элементах силового канала. Для определения потерь энергии в асинхронном электродвигателе необходимо знать закон изменения токов двигателя во время переходного процесса или аналитическое выражение изменения скорости во времени, а также достоверные данные статорной обмотки в случае изменения ее температуры. Потери энергии в насосе можно определить по данным входящей и исходящей мощности. Недоступность отдельных параметров значительно усложняет процедуру идентификации энергетических показателей. В работе проведено исследование энергетических процессов, характерных для электромеханических преобразователей и центробежных насосов, на основе параболических зависимостей скольжения от момента двигателя на рабочем участке механической характеристики и зависимости потерь напора гидравлического источника от производительности. Применение особенностей механической характеристики асинхронного электродвигателя и напорной характеристики насоса позволяет решить задачу определения потерь энергии в электромеханической системе.

Ключевые слова: энергетические показатели; насосная установка; электромеханическая система.

УДК 62-83:628.12

Determination of the energy performance of the pumping unit with adjustable electric drive / O.F. Sokolovskyy.

Consumption power by pumping unit with adjustable electric is determined by the chosen algorithm and network control. This requires careful analysis of phenomenon of cell loss in power channel. To determine the energy losses in asynchronous motors must know the variation of motor current during transient or analytical expression change of speed over time and reliable data stator winding in case of change of temperature. Energy losses in the pump may determined by the data input and output. Non-availability of some parameters complicates the identification process energy indicators. Dependence of head loss hydraulic sources of productivity and dependence of slip on the working of the engine section of the mechanical characteristics are parabolic in nature. In this work the studies energy processes, which taking place in electromechanical transducers, and centrifugal pumps. The use of mechanical characteristics of asynchronous the electric pump and pressure characteristics can solve the problem determine the energy loss in the electromechanical system.

Keywords: energy performance; pump installation; electromechanical system.