

УДК 62-83: 628.12

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ

О. Ф. Соколовський

e-mail: of@ukr.net

Житомирський національний агроекологічний університет
бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

У роботі розглянуто особливості побудови структурних схем електромеханічних систем автоматизації турбомеханізмів. Математичний опис таких установок здійснюється на основі нелінійних диференціальних рівнянь, що вимагає ідентифікації значної кількості вихідних параметрів об'єкта дослідження. Запропоновано структурну схему на основі прямої пропорційності між напором насоса та моментом опору на валу привідного двигуна та нелінійної залежності напору установки від швидкості обертання робочого колеса без використання інформації про гідравлічний опір мережі та продуктивність установки. Для дослідження застосовано систему автоматичного керування, яка передбачає підтримання сталого напору у разі зміни продуктивності установки. Збільшення втрат напору, що відповідає ймовірному зростанню продуктивності, відбувалося синхронно зі зміною навантаження на валу двигуна. При цьому частотний перетворювач забезпечував збільшення швидкості асинхронного двигуна відповідно до алгоритму стабілізації напору. Положення робочої точки під час моделювання визначалося за відомими значеннями швидкості робочого колеса насоса та напору установки, що дозволило провести оцінку енергетичних показників у всьому діапазоні витрат води споживачами за допомогою спеціалізованого прикладного середовища WinCAPS. Було визначено споживану потужність насоса, коефіцієнт корисної дії, струм електродвигуна у всьому діапазоні витрат та напору установки. Аналіз енергетичних показників здійснювався на фіксованих проміжках часу з врахуванням значної інерційності процесів у системах водопостачання. Дослідження підтвердили висунуте припущення про лінійну залежність електромагнітного моменту електродвигуна та втрат напору в насосі. Застосування особливостей механічної характеристики асинхронного електродвигуна та напірної характеристики насоса дозволяє вирішити завдання визначення втрат енергії в електромеханічній системі.

Ключові слова: *структурна схема системи автоматичного керування, перетворювач частоти, електромеханічна система автоматизації насосної установки, моделювання навантаження, втрати напору.*

Постановка проблеми

Сучасний етап економічного розвитку суспільства вимагає впровадження систем керування виробничими механізмами, які повинні забезпечувати необхідні технологічні параметри, надійність та енергоефективність. Дослідження енергетичних показників за допомогою спеціалізованих прикладних програм дозволить провести попередній моніторинг споживання ресурсів та уникнути зайвих витрат під час експлуатації установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження електромеханічних систем автоматизації насосних установок вимагає врахування низки особливостей, притаманних всім турбомеханізмам. Гідравлічні втрати в насосі за однієї і тієї ж продуктивності не залежать від частоти обертання [1, 2]. Напірні характеристики насоса при зміні продуктивності залишаються подібними та зміщуються по вертикалі в координатах на графіку спільної

роботи насоса і трубопроводу [1]. Характерною особливістю насосів і вентиляторів є залежність статичного моменту опору від швидкості обертання робочого колеса [2]. Найбільш сучасним способом зміни швидкості є регулювання за допомогою перетворювачів частоти, які дозволяють плавно змінювати оберти електродвигуна насоса та підтримувати тиск в гідросистемі за різних витрат рідини [3]. Перетворювачі частоти також надають можливість замкненого регулювання технологічних параметрів насоса та формування "насосних" механічних характеристик, які сприяють плавності пуску механізму [4].

Дослідження енергетичних процесів, характерних для електромеханічних перетворювачів та відцентрових насосів, можливе на основі параболічних залежностей ковзання від моменту двигуна та втрат напору гідравлічного джерела від продуктивності на робочій ділянці механічної характеристики [5]. Для дослідження динамічних властивостей таких

систем широко застосовується програмне середовище Simulink пакету Matlab [1,6,7]. Програма пропонує великий вибір методів вирішення диференціальних рівнянь, що описують створену модель, спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком) та дозволяє спостерігати за процесами в системі за допомогою широкого набору пристроїв. Аналіз енергетичних показників насосної установки можна виконати за допомогою спеціалізованого середовища WinCAPS, розробленого компанією Grundfos [8]. Програма допомагає користувачеві визначати споживану потужність насоса, значення ККД, струму електродвигуна у всьому діапазоні витрат та напору установки.

Мета, завдання та методика досліджень

Проектування сучасних систем електропривода пов'язаний з низкою вимог, що підпорядковуються особливостям технологічного процесу. Реалізація відповідних завдань неможлива без використання структурних схем об'єкта дослідження та проведення комп'ютерного моделювання. Дослідження комп'ютерних моделей дозволяє встановити основні фактори, що визначають властивості об'єкта дослідження, зокрема реакцію системи на зміну її параметрів і початкових умов. Під час досліджень автоматизованих електроприводів насосних установок недостатня увага приділена розробці методів, які дозволяють встановити динамічні властивості системи на основі спрощених залежностей з врахуванням закономірностей, характерних для турбомеханізмів та нагнітачів. Метою роботи є побудова структурної схеми системи автоматичного керування насосною установкою з врахуванням нелінійної залежності напору установки від швидкості обертання робочого колеса, лінійного зв'язку між втратами напору в насосі та навантаженням двигуна з подальшим аналізом енергетичних показників розробленої системи. Об'єктом дослідження є процес керування насосною установкою. Дослідження побудовано на базі математичного моделювання, положень теорії автоматичного керування та основних закономірностей, притаманних турбомеханізмам.

Результати досліджень

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 [1]:

$$\dot{x}_n = f(t, x, u), \quad (1)$$

де t – змінна, що визначає час; $x \in R^n$ – вектор змінних стану; $u \in R^m$ – вхідний вектор. Використовуючи звичайні означення для векторів:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \quad u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_m \end{pmatrix} \quad f(t, x, u) = \begin{pmatrix} f_1(t, x, u) \\ f_2(t, x, u) \\ \dots \\ f_m(t, x, u) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Системи водопостачання належать до об'єктів із відносно повільними змінами технологічних параметрів. Якщо припустити, що напір та витрати насосних станцій є сталими на певних проміжках часу, то втрати енергії в насосі у разі перевищення напору [3]:

$$\Delta W_{BH} = 9,81 \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta H_i t_i}{\eta_{BH_i}}, \quad (3)$$

де Q_i , ΔH_i , η_{BH_i} – подача, перевищення напору, ККД насоса на проміжках часу t_i ; N – кількість фіксованих проміжків часу.

У випадку роботи без перевищення напору втрати енергії визначаються лише значенням ККД відцентрового насоса за відповідного напору та продуктивності [5]:

$$\Delta W_{BHi} = 9,81 \cdot Q_i t_i \left(H_0 \left(\frac{f_i}{f_{ном}} \right)^2 - \Delta H_{ном} \left(\frac{Q_i}{Q_{ном}} \right)^2 \right) \left(\frac{1}{\eta_{BHi}} - 1 \right), \quad (4)$$

де H_0 – фіктивний напір насоса за нульової продуктивності та номінальної частоти обертання; $\Delta H_{ном}$ – втрати напору в насосі за номінальної продуктивності та номінальної частоти обертання; $Q_{ном}$ – номінальна продуктивність установки; $f_{ном}$ – номінальна частота живлення двигуна. У виразі (4) 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 із зростанням витрат води.

Енергетичні показники елементів силового каналу та електромеханічної системи в цілому [2]:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum_1^N \Delta P_{\Sigma i} t_i = \sum_1^N (\Delta P_{АДi} + \Delta P_{BHi}) t_i, \quad (5)$$

де $\Delta P_{\Sigma i}$ – сумарні втрати в насосній установці на відповідних проміжках часу.

Втрати енергії з урахуванням параболічного характеру залежності ковзання від електромагнітного моменту на робочій ділянці механічної характеристики двигуна можна визначити за формулою [5]:

$$\Delta W_{АДi} = M_i t_i \left(\omega_0 \frac{f_i}{f_{ном}} - \Delta \omega_{ном} \left(\frac{M_i}{M_{ном}} \right)^2 \right) \left(\frac{1}{\eta_{АДi}} - 1 \right), \quad (6)$$

де ω_0 – синхронна швидкість обертання; $\Delta \omega_{ном}$ – спад частоти обертання за номінального електромагнітного моменту та номінальної швидкості ротора; $M_{ном}$ – номінальний момент електродвигуна; M_i , $\eta_{АДi}$ – електромагнітний момент, ККД двигуна на проміжку часу t_i .

Для досліджень зазвичай використовують 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 [1,5]. Структурна схема насосної установки в середовищі Simulink представлена на рис. 1.

Система рівнянь, що описує математичну модель насосної установки:

$$H = H_0 - a_{\phi} Q^2 - L \dot{Q}, \quad (7)$$

$$H = H_{CT} + a Q^2 + L \dot{Q}, \quad (8)$$

$$L = \frac{m}{\rho g S^2}, \quad (9)$$

$$M_C = \frac{QH\rho g}{\eta_{BH} \omega_{BH}}, \quad (10)$$

де H , Q – напір та продуктивність насоса; H_{CT} – статичний напір; a_{ϕ} – гідравлічний опір насоса; a – гідравлічний опір мережі; L – фіктивна індуктивність гідравлічної мережі; m – маса води в трубопроводі; S – площа поперечного перерізу трубопроводу; ω_{BH} – частота обертання насоса; M_C – момент опору на валу насоса; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння.

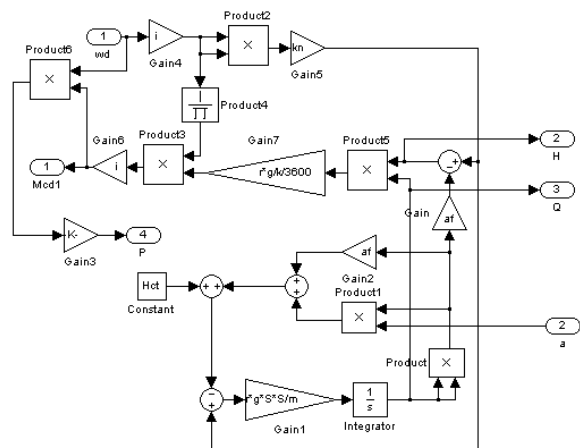


Рис. 1. Математична модель одноагрегатної насосної установки з врахуванням диференціальних рівнянь

Застосування математичної моделі на основі диференційних рівнянь вимагає використання великої кількості вихідної інформації та ускладнює процес дослідження насосної установки. Для спрощення досліджень пропонується структурна схема насосного агрегату (рис. 2), яку побудовано на основі виразу:

$$H = H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - \Delta H, \quad (11)$$

де $\omega_{ном}$ – номінальна частота обертання робочого колеса; ΔH – втрати напору в насосі.

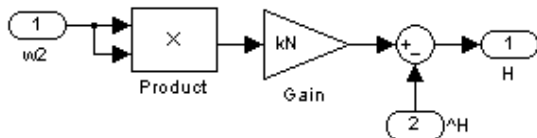


Рис. 2. Спрощена математична модель одноагрегатної насосної установки

Коефіцієнт пропорційності за напором:

$$k_N = \frac{H_{ном}}{\omega_{ном}^2}, \quad (12)$$

де $H_{ном}$ – номінальний напір насоса; $\omega_{ном}$ – частота обертання робочого колеса насоса, яка забезпечує нульову продуктивність за номінального напору.

Таку модель легко інтегрувати в систему автоматичного керування, яка передбачає підтримання сталого напору у разі зміни продуктивності установки (рис. 3). ПІ-регулятор у запропонованій схемі представлений пропорційною та інтегрувальною ланками, що дозволяє обмежувати не тільки вихідний сигнал, а й інтегральну складову. Частотний перетворювач розглядається як безінерційна ланка з одиничним коефіцієнтом передачі. Структурна схема асинхронного електродвигуна побудована на основі аперіодичної ланки першого порядку. Електромагнітна інерція враховується через електромагнітну сталу часу,

механічна – через момент інерції, приведений до вала двигуна.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за напором:

$$k_1 = \frac{f'_{ном}}{H_{ном}} \quad (13)$$

де $f'_{ном}$ – частота перетворювача, за якої забезпечується нульова продуктивність та номінальний напір.

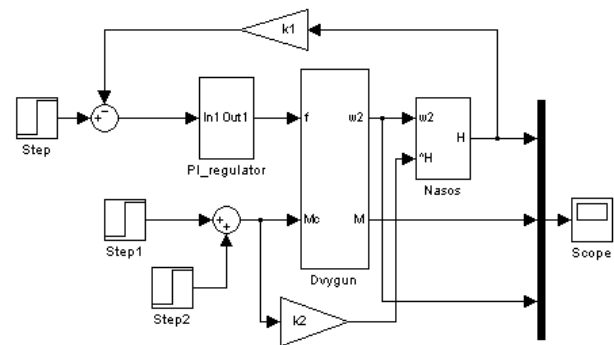


Рис. 3. Структурна схема системи автоматичного керування

Моделювання навантаження виконаємо з урахуванням прямої пропорційності між моментом опору на валу привідного двигуна та напором установки. Збільшення втрат напору, що відповідатиме ймовірному зростанню продуктивності, буде відбуватися синхронно зі зміною навантаження на валу двигуна.

У такому випадку коефіцієнт зміни напору:

$$k_2 = \frac{H_0 - H_{ном}}{M_{ном}}, \quad (14)$$

де $M_{ном}$ – номінальний момент привідного двигуна.

Для дослідження використаний асинхронний електродвигун АИР100S2 з наступними даними [7]:

$$P_{2ном} = 4 \text{ кВт}; \quad \eta_{ад} = 0,87;$$

$n_{ном} = 2850 \text{ об/хв};$
 $M_{ном} = 13,4 \text{ Нм}.$ Номінальний напір насосної установки прийнято на рівні 34,6 м, втрати напору – 9,3 м, коефіцієнт пропорційності за

напором становив 0,0005, коефіцієнт зміни напору дорівнював 0,69. Під час дослідження проведено моделювання зростання навантаження на шести фіксованих проміжках часу з інтервалом 10 с. Напір установки, швидкість регульованого електропривода змінювалися за

коливальним законом із незначним перерегулюванням (рис. 4). Час пуску не перевищував 0,5 с. Тривалість перехідних процесів при зміні водоспоживання складала 0,2 с.

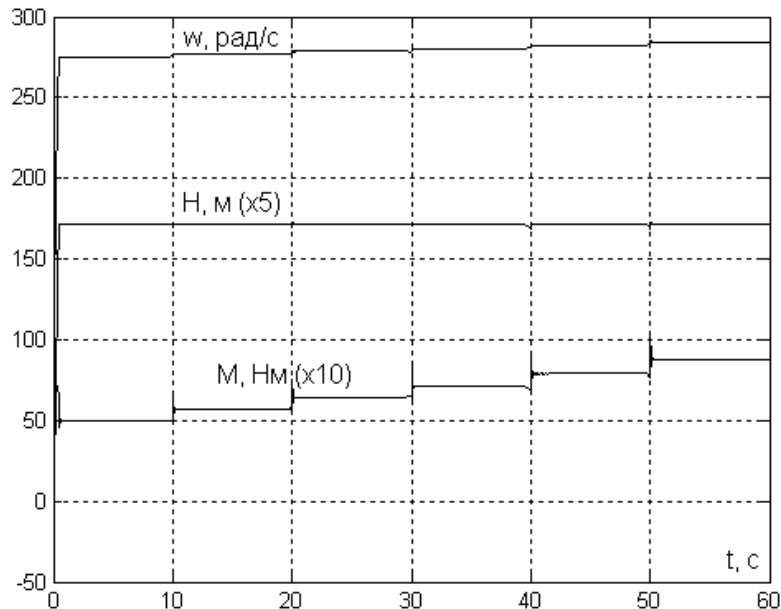


Рис. 4. Графіки перехідних процесів насосної установки

Графік основних параметрів системи, представлений у вигляді векторів дискретних значень, на шести фіксованих проміжках часу:

$$f = \begin{pmatrix} 45,0 \\ 45,5 \\ 46,0 \\ 46,5 \\ 47,0 \\ 48,0 \end{pmatrix} \quad H_0 = \begin{pmatrix} 35,56 \\ 36,35 \\ 37,16 \\ 37,97 \\ 38,79 \\ 40,46 \end{pmatrix} \quad \Delta H = \begin{pmatrix} 0,96 \\ 1,75 \\ 2,56 \\ 3,37 \\ 4,19 \\ 5,86 \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 8 \\ 10 \\ 12 \\ 14 \\ 16 \\ 18 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} 4,97 \\ 5,67 \\ 6,40 \\ 7,14 \\ 7,91 \\ 8,76 \end{pmatrix}$$

Втрати потужності, значення ККД в асинхронному двигуні та відцентровому насосі на фіксованих проміжках часу визначимо за допомогою програми WinCAPS [8]. Під час досліджень використана насосна установка CRE-20-3 з вбудованим перетворювачем частоти.

Дані відцентрового насоса:
 $Q_{ном} = 21 \text{ м}^3 / \text{год}$; $H_0 = 43,9 \text{ рад} / \text{с}$;

$\Delta H = 9,3 \text{ м}$; $\eta_{BH} = 0,714$. Значення статичного напору прийнято на рівні 10 м. Напірні характеристики насоса у WinCAPS побудовані із врахуванням зміни ковзання двигуна за фіксованої синхронної частоти. У процесі дослідження витрати води збільшувалися від $8 \text{ м}^3 / \text{год}$ до $18 \text{ м}^3 / \text{год}$, що відповідає робочому діапазону установки. На четвертому проміжку (рис. 5) споживана

потужність установки становить 2,38 кВт, коефіцієнт корисної дії насоса складає 95,25 % відносно номінального значення, струм обмотки статора на 53,15 % менший від номінальної величини. Спад частоти обертання на даній

ділянці механічної характеристики – 60 об/хв. Втрати потужності в насосі за продуктивності 14 м³/год. та напору 34,6 м перевищують втрати в електродвигуні на 17 %.

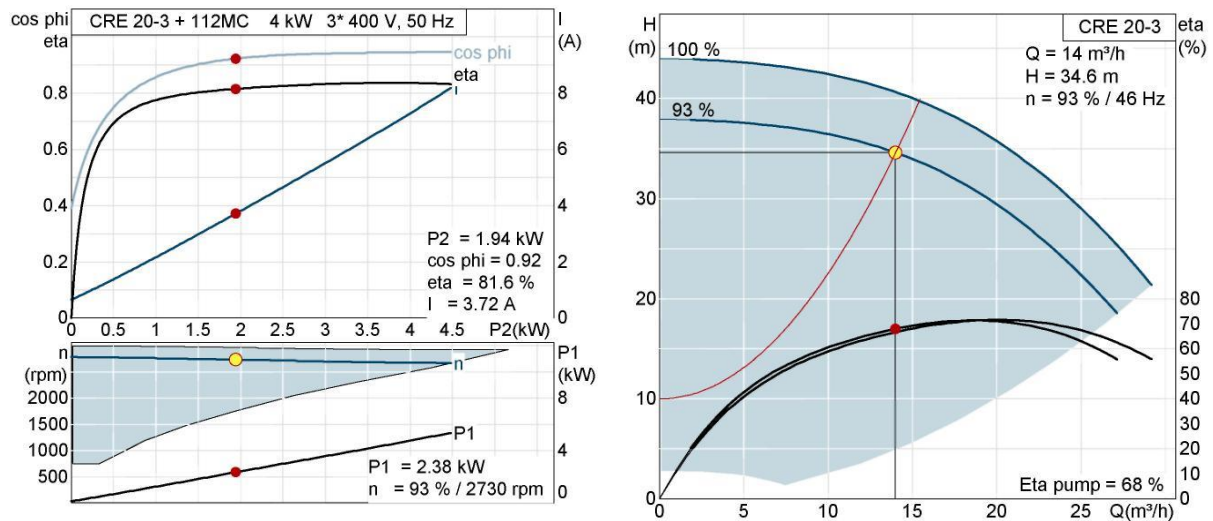


Рис. 5. Робочі характеристики насосної установки

Втрати енергії в асинхронному двигуні на інтервалі часу 60 с склали 7,1 Вт год. Відмінність між спожитою та вихідною енергією в насосі становила 10,4 Вт год. Найбільший дисбаланс із процентним співвідношенням 20,2/44,2 між втратами в двигуні і насосі спостерігався на першому проміжку часу. Діапазон відхилень ККД насоса у процесі дослідження коливався в межах від 78,2 % до 99,7 % відносно

номінального (рис. 6а). Значення ККД привідного двигуна на шести проміжках часу перебувало між відмітками 79,8–82,4 %. Графік моменту електродвигуна від втрат напору в насосній установці наближений до лінійної залежності (рис. 6б). Величина достовірності апроксимації становить 0,984. Незначне відхилення обумовлене коливаннями номінального значення втрат напору за різних швидкостей робочого колеса насоса.

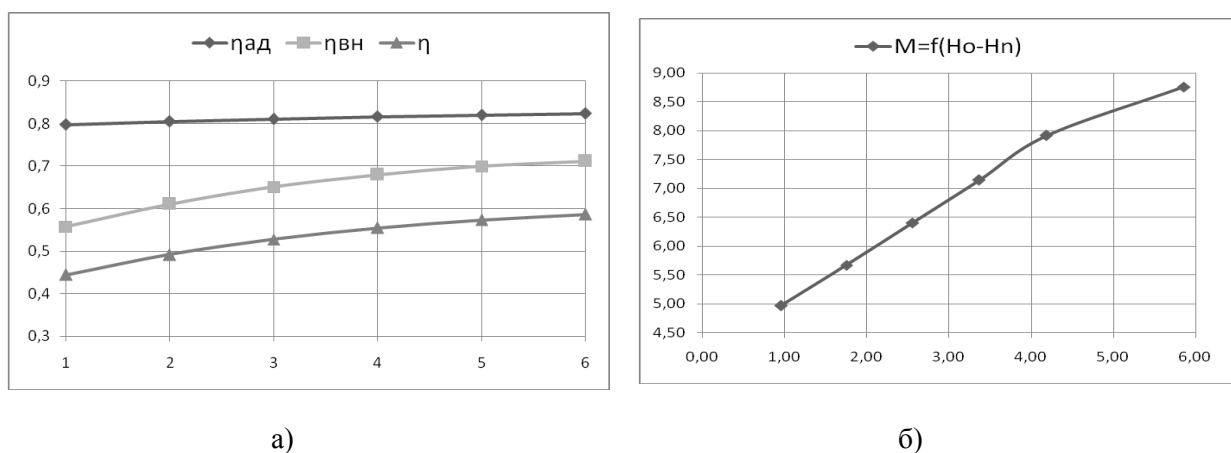


Рис. 6. Енергетичні показники насосної установки

Висновки та перспективи подальших досліджень

Запропонована модель насосної установки спрощує процес дослідження електромеханічної системи та вимагає обмеженої кількості вихідних параметрів. Динамічні властивості системи визначаються інерційністю електромеханічного перетворювача без врахування сталих часу перетворювача частоти та гідравлічної мережі. Застосування квадратичної залежності між напором і частотою обертання та врахування коефіцієнта зміни напору забезпечує точне відтворення траєкторії руху робочої точки в статичних режимах. Визначення положення робочої точки можливе завдяки відомим значенням швидкості робочого колеса насоса та напору установки під час моделювання в Simulink, що дозволяє провести оцінку енергетичних показників у всьому діапазоні витрат води споживачами. Залежність електромагнітного моменту двигуна від напору має лінійний характер, що підтверджує висунуте припущення і дозволяє виконувати дослідження на базі запропонованої структурної схеми та оцінювати енергетичні показники установки за допомогою спеціалізованого прикладного середовища.

Подальші дослідження рекомендується направити на розробку математичної моделі, яка автоматично змінюватиме уставку напору на виході системи у залежності від тенденції водоспоживання.

References

1. Popovych, M. G., Lozynskyi, O. Y. & Klepikov, V. B. (2005). Elektromekhanichni systemy avtomatichnoho keruvannya ta elektroprivody [Electromechanical systems of automatic control and electric drives]. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
2. Zakladnoy, A. N., Prakhovnyk, A. V. & Solovey, A. I. (2001). Energoberezheniye sredstvami promyshlennogo yelektroprivoda [Energy saving means of industrial electric drive]. Kiev: Diya. [in Russian].
3. Leznov, B. S. (2006). Energoberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh [Energy saving and adjustable drive in pump and pressure installations]. Moskva: Energoatomizdat [in Russian].
4. Belov, M. P., Novykov, V. A. &

Rassudov, L. N. (2006). Avtomatizirovannyy elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov [Automated electric drive of typical production mechanisms and technological complexes]. Moskva: Publishing center "Akademiya" [in Russian].

5. Sokolovskyi, O. F. (2015). Vyznachennia enerhetychnykh pokaznykiv nasosnoi ustanovky z rehulovanyym elektroprivodom [Determination of the energy performance of the pumping unit with adjustable electric drive]. Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, 4 (71), 114–120 [in Ukrainian].

6. Ostroverkhov, M. Y. & Pyzhov, V. M. (2008). Modelyuvannya elektromekhanichnykh system v Simulink [Modeling of electromechanical systems in Simulink]. Kyiv: Publishing center "Stylos" [in Ukrainian].

7. Sokolovskyi, O. F. & Rybachuk, O. I. (2012). Rozrobka ta doslidzhennya elektroprivoda typovoho tekhnolohichnoho obladnannya [Development and research of electric drive of typical technological equipment]. Zhytomyr: ZVI NAU [in Ukrainian].

8. WinCAPS. Retrieved from <http://grundfos.com>

MATHEMATICAL MODEL OF THE PUMP WITH LIMITED INITIAL INFORMATION

O. Sokolovskyi

e-mail: of@ukr.net

Zhytomyr National Agroecological University,
Stary Boulevard, 7, Zhytomyr, 10002, Ukraine

The publication deals with the peculiarities of construction of structural schemes of pumps and fans. A mathematical description of such installations is performed using nonlinear differential equations. There is also a need to identify a large number of parameters of the research object. The proposed structural scheme takes into account the linear relationship between pump pressure and motor torque. Information about hydraulic resistance and plant performance is not used. The position of the working point was determined by the known speed of the wheel and pressure. The automatic control system involves maintaining a steady pressure while increasing installation performance. The increase in head loss occurs synchronously with the increase in engine load. The frequency converter increased the speed of the engine by the algorithm of stabilization of the pressure. The estimation of energy indices in the whole range of water consumption is carried out

with the help of a specialized program WinCAPS. This allowed determining the power consumption of the pump, the efficiency, the current of the engine over the entire range of water consumption. The analysis of energy indices was carried out at fixed intervals of time. The research takes into account the inertia of processes in water supply systems. The studies confirmed the assumption of linear dependence of engine torque and head loss in the pump. Application of features of the mechanical characteristics of the asynchronous electric motor and the characteristics of the pump pressure can solve the problem of determining energy losses.

Keywords: structural diagram of automatic control system, frequency converter, electromechanical pump system automation system, load modeling, pressure loss.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

О. Ф. Соколовский

e-mail: of@ukr.net

Житомирский национальный
агроэкологический университет

бульвар Старый, 7, г. Житомир, 10002, Украина

В работе рассмотрены особенности построения структурных схем электромеханических систем автоматизации турбомеханизмов. Математическое описание таких установок осуществляется на основе нелинейных дифференциальных уравнений, что требует идентификации значительного количества выходных параметров объекта исследования. Предложена структурная схема на основе прямой пропорциональности между напором насоса и моментом сопротивления на валу приводного двигателя и нелинейной зависимости напора установки от скорости вращения рабочего колеса без использования информации о гидравлическое сопротивление сети и производительности установки. Для исследования применена система автоматического управления, которая

предусматривает поддержание устойчивого напора в случае изменения производительности установки. Увеличение потерь напора, соответствующее предполагаемому росту производительности, происходило синхронно с изменением нагрузки на валу двигателя. При этом частотный преобразователь обеспечивал увеличение скорости асинхронного двигателя в соответствии с алгоритмом стабилизации напора. Положение рабочей точки при моделировании определялось по известным значениям скорости рабочего колеса насоса и напора установки, что позволило провести оценку энергетических показателей во всем диапазоне расхода воды потребителями с помощью специализированной прикладного среды WinCAPS. Это позволило определить потребляемую мощность насоса, значение КПД, тока электродвигателя на всем диапазоне расхода и напора установки. Анализ энергетических показателей осуществлялся на фиксированных промежутках времени с учетом значительной инерционности процессов в системах водоснабжения. Исследования подтвердили выдвинутое предположение о линейной зависимости электромагнитного момента электродвигателя и потерь напора в насосе. Применение особенностей механической характеристики асинхронного электродвигателя и напорной характеристики насоса позволяет решить задачу определения потерь энергии в электромеханической системе.

Ключевые слова: структурная схема системы автоматического управления, преобразователь частоты, электромеханическая система автоматизации насосной установки, моделирование нагрузки, потери напора.