

УДК 621.384 / 534.232

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ВОДООЧИСТКИ ТА ВОДОПІДГОТОВКИ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вадим Пташник^{1,2}, к.т.н., Віктор Чумакевич^{3,4}, к.т.н., Ігор Пулеко^{4,5}, к.т.н., Юрій Бондаренко⁴, к.т.н., Вікторія Чумакевич³, Михайло Бабич¹, к.т.н.

¹ Львівський національний університет природокористування, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівська обл., Україна, e-mail: ptashnykproject@gmail.com (В.П.)

² Львівський національний університет ім. І. Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна,

³ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: victoriachu21@gmail.com (В.Ч.)

⁴ Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова, просп. Миру, 22, м. Житомир, Україна, e-mail: chumakevich@ukr.net (В.Ч.), ostrovitynin75@ukr.net (Ю.Б.)

⁵ Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, e-mail: pulekoigor@ztu.edu.ua (І.П.)

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.086>

Пташник В., Чумакевич В., Пулеко І., Бондаренко Ю., Чумакевич В., Бабич М. Обґрунтування вибору системи керування електроприводом насосного агрегату для водоочистки та водопідготовки на основі комп'ютерного моделювання

У статті розглянуто питання вдосконалення системи керування електроприводом насоса водоочисної системи цукрового заводу. На прикладі протічного діафрагмового електролізера зі споживаною потужністю 5 кВт та продуктивністю за анолітом 4,5–5 м³/год розглянуто роботу промислової водоочисної системи. Спираючись на відомі методики розрахунку, проаналізовано дросельний та частотний методи керування електроприводу насосного агрегату. Зокрема, розраховано спожиту потужність, коефіцієнт корисної дії, момент, швидкість обертання вала як функції витрати води із забезпеченням заданого тиску. Розраховано коефіцієнти корисної дії установки з різними методами керування та показано енергетичні переваги частотного методу керування насосним агрегатом. Водночас встановлено, що в режимі частотного керування двигуном збільшення гідравлічного опору системи призводить до зниження економії електроенергії. Для дослідження асинхронного двигуна під час прямого пуску з вентиляторним моментом статичного навантаження використано нелінійну MathCAD-модель. За результатами моделювання встановлено, що під час пуску асинхронного приводу насоса двигун дуже швидко виходить на номінальний режим роботи, але момент постійно пульсує. За допомогою математичної моделі системи автоматичного керування проведено порівняння роботи розімкненої та замкненої систем. Аналіз отриманих діаграм Найквіста, амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик показав підвищення стійкості роботи для замкненої системи. Проведено моделювання використання П-, ПІ- та ПІД-регуляторів. Усі розглянуті схеми спочатку дають гарну стабілізацію, але з часом П- та ПІ-регулятори викликають нестійку роботу системи. А у системі з ПІД-регулятором підбір параметрів дозволив отримати перехідний процес тривалістю близько 0,2 с.

Ключові слова: система керування електроприводу, насосний агрегат, частотне керування.

Ptashnyk V., Chumakevych V., Puleko I., Bondarenko Yu., Chumakevych V., Babych M. Justification of the choice of the electric drive control system for pump unit of water treatment and water conditioning based on computer modeling

This article addresses the enhancement of the control system for the electric drive of the pump in the water treatment system used at a sugar factory. The study focuses on a flow diaphragm electrolyzer with a power consumption of 5 kW and an anolyte productivity ranging from 4.5 to 5 m³/h, examining the operation of an industrial water treatment system. Utilizing established calculation methods, the analysis compares throttle control and frequency control for the electric drive of the pumping unit. Key parameters, including consumed power, efficiency factor, torque, and shaft rotation speed, are calculated as functions of water flow while maintaining a specified pressure. The efficiency coefficients for the installation under different control methods are calculated, demonstrating the energy advantages of the frequency control method for the pumping unit. It was observed that, in frequency control mode, an increase in the hydraulic resistance of the system results in reduced electricity savings. A nonlinear MathCAD model was employed to evaluate an asynchronous motor starting directly under a fan torque and static load. The simulation results indicate that during the startup of the pump's

asynchronous drive, the motor quickly reaches its nominal operating mode; however, the torque exhibits continuous pulsations. A mathematical model of the automatic control system allowed for a comparison between open and closed systems. Analysis of the resulting Nyquist diagrams, along with amplitude-frequency and phase-frequency characteristics, revealed an enhancement in operational stability for the closed system. Further simulations were conducted evaluating the performance of P-, PI-, and PID-regulators. Initially, all configurations provided effective stabilization; however, P- and PI-regulators eventually led to unstable operations. In contrast, the system utilizing a PID controller, with appropriately selected parameters, achieved a transient response lasting approximately 0.2 seconds.

Keywords: electric drive control system, pump unit, frequency control.

Постановка проблеми. Українське виробництво планомірно впроваджує європейські стандарти у сфері харчових технологій. Однією з важливих складових частин виробництва є його екологічна складова. Бурякоцукрове виробництво є в Україні традиційним, але, на жаль, досі використовує технології ХХ століття. Сьогодні спостерігається впровадження нових систем очищення води на цукровому виробництві. З-поміж багатьох установок для очищення [13; 16; 17] було обрано протічний діафрагмовий електролізер «ХЕКОМ-5» зі споживаною потужністю 5 кВт/год, блоком стабілізації та продуктивністю за анолітом 4,5 – 5 м³/год. Для надійної роботи таких систем [2; 10] необхідно стабілізувати потік води через очисні пристрої. Згідно з характеристиками пристрою необхідно забезпечити швидкість надходження рідини в електролізер на рівні 130 – 150 л/хв, або 7,8 – 9 м³/год. На об'єкті встановлено насоси з електричним приводом, тому досліджували питання вдосконалення системи керування електроприводом насоса водоочисної установки на цукровому виробництві.

Постановка завдання. Мета дослідження: полягає в розробці комп'ютерної моделі для оптимізації системи керування електроприводом насосного агрегату, що використовується у водоочисній системі цукрового заводу. Досягнення поставленої мети передбачає проведення кількох взаємопов'язаних етапів дослідження. По-перше, слід провести аналіз різних методів керування електроприводом, зокрема дросельного та частотного. По-друге, за допомогою комп'ютерної моделі слід оцінити вплив різних методів керування на енергоспоживання і роботу насоса. По-третє, передбачається порівняння способів стабілізації роботи системи за допомогою регуляторів (П, ПІ, ПІД) та проведення комп'ютерного моделювання для визначення найефективніших параметрів керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час вибору способу керування подачею води необхідно враховувати безліч чинників. Основними з них, ми вважаємо, є енергетичні показники. Ми повинні забезпечити подання необхідної кількості води за мінімальних витрат енергії. Розглянемо енергетичні показники за

використання дросельного та частотного способів керування насосними агрегатами.

Проілюструємо роботу водонасосних систем з регулювання подачі води дроселюванням. Насос споживає потужність P , Вт, яка визначається за формулою

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta}, \quad (1)$$

де H – повний напір; Q – продуктивність (подача); ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння; η – коефіцієнт корисної дії насоса.

Рис. 1 показує переваги частотного керування насосом. Потужність, яку споживає насос, відповідає площі прямокутника $OKAL$. Під час регулювання подачі води за допомогою дросельної засувки змінюється гідравлічний опір магістралі, а при $\omega = \omega_{ном} = const$ робоча точка переміщується вздовж кривої до точки B (витрата $0,6 H_{ном}$), яка характеризує номінальну швидкість обертання електродвигуна до перетину з ізобарою режиму магістралі. Гідравлічний напір при цьому зростає і стає рівним $1,5 Q_{ном}$. Потужність, яка споживається, пропорційна площі прямокутника $ODBF$, яка не сильно відрізняється від номінального режиму. Отже, зменшення енергоспоживання при зменшенні споживання води практично не відбувається.

Якщо змінювати швидкість обертання електродвигуна, опір магістралі незмінний (пряма 3) зменшення споживання відбувається за рахунок зменшення швидкості обертання (крива 2), робоча точка переміщується нижче в точку C і споживана потужність менша (пропорційна площі прямокутника $OECF$). Необхідно зазначити, що також зменшується й тиск у системі, а відповідно й витрата води.

Розглянемо методику математичного обґрунтування енергоспоживання за різних способів регулювання напору насоса [2; 7; 10]:

$$H = H_{0н} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q^2, \quad (2)$$

де $H_{0н}$ – напір насоса при $Q = 0$ і $\omega = \omega_{ном}$; $\omega_{ном}$ – номінальна швидкість електродвигуна; C – конструктивний коефіцієнт насоса; $H_{ном}$ та $Q_{ном}$ – номінальні напір та витрата.

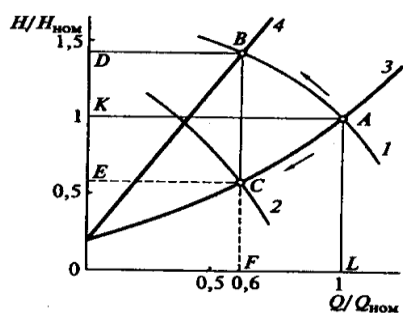


Рис. 1. Характеристика продуктивності відцентрового насоса при дросельному і частотному регулюванні [2]: 1 – характеристика нерегульованого електроприводу насоса при номінальній швидкості обертання; 2 – характеристика регульованого електроприводу; 3 – графік, що характеризує роботу магістралі при мінімальному гідравлічному опорі; 4 – графік, який характеризує роботу магістралі при збільшеному гідравлічному опорі; A – початкова точка дослідження, засувка повністю відкрита; B – нерегульований електропривод, засувка частково закрита; C – зменшення швидкості обертання електроприводу двигуна насоса, засувка відкрита; D – максимальний відносний напір; E – мінімальна відносний напір; F – точка на осі абсцис, що відповідає мінімальній відносній продуктивності; K – точка на осі ординат, що відповідає одиничному відносному напору; L – точка на осі абсцис, що відповідає одиничній відносній продуктивності

Fig. 1. Performance characteristics of a centrifugal pump with throttle and frequency control [2]: 1 - characteristics of the non-regulated electric drive of the pump at the nominal speed of rotation; 2 - characteristics of the adjustable electric drive; 3 - a graph characterizing the operation of the main line at minimum hydraulic resistance; 4 - a graph characterizing the operation of the pipeline with increased hydraulic resistance; A - the starting point of the study, the latch is fully open; B - a non-regulated electric drive, the latch is partially closed; C - a decrease in the speed of rotation of the electric drive of the pump motor, the valve is open; D - a maximum relative pressure; E - a minimum relative pressure; F - a point on the abscissa axis corresponding to the minimum relative productivity; K - a point on the ordinate axis corresponding to unit relative pressure; L - a point on the abscissa axis corresponding to unit relative productivity

Свою чергою, конструктивний коефіцієнт насоса можна обчислити за формулою

$$C = \frac{H_{0H} - H_{ном}}{Q_{ном}^2} \quad (3)$$

Якщо позначити протитиск (статичний напір) при закритій заслінці ($Q = 0$) через H_c , характеристики магістралі можна поєднати формулою

$$H = H_c + R \cdot Q^2, \quad (4)$$

де H_c – протитиск (статичний напір); R – коефіцієнт опору магістралі:

$$R = \frac{(H_{ном} + H_c)}{Q_{ном}^2} \quad (5)$$

Для визначення споживаної насосною установкою потужності з мережі використаємо відому формулу

$$P_1 = \frac{P_{мех}}{\eta_1}, \quad (6)$$

де η_1 – коефіцієнт корисної дії електродвигуна; $P_{мех} = M_c \cdot \omega$ – потужність на валу двигуна насоса; M_c – момент статичного навантаження на валу електродвигуна.

Коли регулювання подачі води здійснюється за допомогою дросельної заслінки $\omega = \omega_{ном} = const$, коефіцієнт корисної дії електродвигуна не буде змінюватись і може визначатись відповідно до виразу

$$\eta_1 = \frac{(1 - S_{ном})}{(a \cdot S_{ном} + 1)}, \quad (7)$$

де $S_{ном}$ – номінальне ковзання асинхронного двигуна; $a = R_1/R_2$ – коефіцієнт, який характеризує відношення активного опору обмотки статора R_1 до приведенного опору обмотки ротора R_2 .

При частотному способі керування, без врахування втрат у сталі та втрат неробочого ходу, а також незмінному номінальному ковзанні коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна насоса можна знайти за формулою

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \cdot \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} \cdot (1 + a)} \quad (8)$$

У формулі (2) проведемо заміну $\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2$ на $\left(\frac{1 - S}{1 - S_{ном}}\right)^2$. Після розв'язування рівнянь (2)

та (4) відносно S отримаємо:

$$S = 1 - (1 - S_{ном}) \sqrt{h_c + Q^2 \cdot (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{ном}) \cdot A \quad (9)$$

Момент на валу механізму у відносних одиницях, коли він працює на мережу з незмінними параметрами, визначають так:

$$\mu = \mu_{0c} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - h_c} \quad (10)$$

де μ_{0c} – статичний відносний момент на валу при закритій заслінці ($Q^* = 0$).

Вирази (9) та (10) дозволяють визначити основні характеристики (спожиту потужність, обертання) у функції витрати води при заданому тиску. Для зручності порівняння виразимо потужність P_I у відносних одиницях залежно від витрати рідини Q . Базовою величиною оберемо номінальну потужність $P_{ном}$ та номінальний момент $M_{ном}$. Запишемо вирази для дросельного:

$$P_{I*} = \frac{(\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c}) \cdot Q^*) (1 + a \cdot S_{ном})}{1 - S_{ном}} \quad (11)$$

та частотного керування:

Таблиця 1. Споживана електроприводом відцентрового насоса потужність при дросельному і частотному керуванні залежно від витрати рідини і статичного напору (тиску) при $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$

Table 1. The power consumed by the electric drive of the centrifugal pump during throttle and frequency control depending on the flow of liquid and static head (pressure) at $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$

Витрата Q^*	P_{I*}					
	Дросельне керування	Частотне керування				
		$H_c = 0$	$H_c = 0,2$	$H_c = 0,4$	$H_c = 0,6$	$H_c = 0,8$
0	0,43	0	0,04	0,11	0,2	0,31
0,2	0,56	0,01	0,08	0,18	0,3	0,42
0,4	0,69	0,08	0,16	0,28	0,41	0,55
0,6	0,82	0,24	0,35	0,45	0,58	0,7
0,8	0,95	0,56	0,64	0,71	0,8	0,87
1	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08

Таблиця 2. Потужність, спожита електроприводом відцентрового насоса для різних способів керування при початковому статичному моменті $\mu_{0c} = 0$ і статичному напорі води $H_c = 0$

Table 2. The power consumed by the electric drive of the centrifugal pump for different control methods at the initial static moment $\mu_{0c} = 0$ and the static water pressure $H_c = 0$

Способи керування	Q^*					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
P_{I*} – режим дросельного керування	0	0,22	0,44	0,66	0,88	1,08
P_{I*} – режим частотного керування	0	0,01	0,08	0,24	0,56	1,08

Відповідно до отриманих результатів робимо висновок, що при збільшенні гідравлічного опору системи (збільшенні h_c) знижується економія електроенергії при частотному керуванні двигуном. Електропривод насосних установок має вентиляторний момент навантаження (рис. 4), тому відповідно до

коефіцієнт корисної дії, момент, швидкість

$$P_{I*} = (\mu_{0c} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0c}) \cdot A^2 \cdot Q^*) \left(1 + \frac{S_{ном} \cdot (1 + a)}{(1 - S_{ном}) \cdot A} \right) \quad (12)$$

Результати проведених розрахунків для $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$ наведено в табл. 1 і 2, а також на рис. 2 і 3.

законів подібності можна записати в умовних одиницях при постійному коефіцієнті корисної дії двигуна:

$$Q_* = \frac{Q}{Q_{ном}} = \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad (13)$$

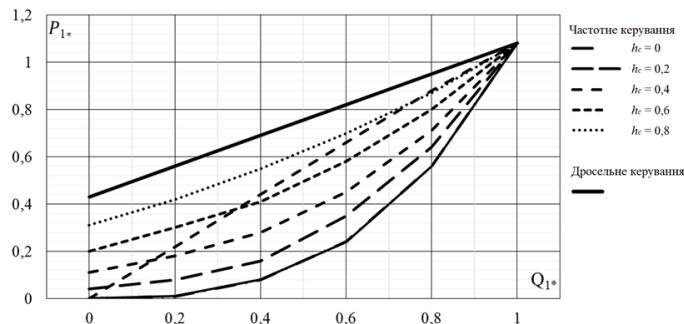


Рис. 2. Залежність $P_{I*} = f(Q_*)$ у режимі дросельного і частотного керування при $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$
Fig. 2. Dependence $P_{I*} = f(Q_*)$ in throttle and frequency control mode at $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$

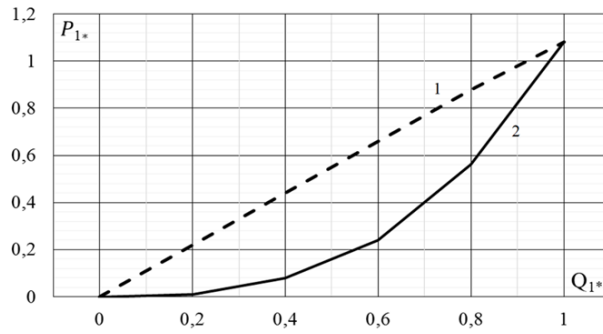


Рис. 3. Залежність $P_{1*} = f(Q_*)$ при дросельному (крива 1) і частотному (крива 2) керуванні при $\mu_{0c} = 0,4$; $H_c = 0$

Fig. 3. Dependence $P_{1*} = f(Q_*)$ with throttle (curve 1) and frequency (curve 2) control at $\mu_{0c} = 0,4$; $H_c = 0$

$$H_* = \frac{H}{H_{ном}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \quad (14)$$

$$M_* = \frac{M}{M_{ном}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \quad (15)$$

$$P_{мех} = \frac{P_{мех}}{P_{ном}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^3, \quad (16)$$

де $\omega_{ном}$ – номінальна швидкість обертання двигуна; $M_{ном}$ – номінальний момент двигуна; $P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна.

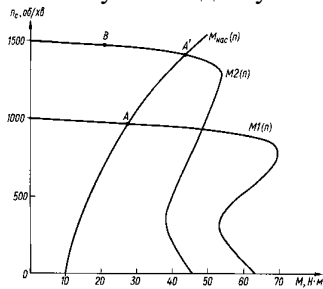


Рис. 4. Механічні характеристики асинхронних двигунів з рівними швидкостями обертання $M_1(n)$, $M_2(n)$ та статичний момент вентиляторного навантаження $M_{нас}(n)$

Fig. 4. Mechanical characteristics of asynchronous motors with equal rotation speeds $M_1(n)$, $M_2(n)$ and static fan load moment $M_{нас}(n)$

Виклад основного матеріалу. Відповідно до відомих методик визначимо потужність електродвигуна для перекачування води об'ємом 150 л/хв ($9\text{ м}^3/\text{год}$):

$$P_o = \frac{K_3 \cdot Q_p \cdot H_p \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3}}{3600 \cdot \eta_p}, \quad (17)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу; H_p – робоча точка насоса; η_p – ККД; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння.

Згідно з вихідними даними ($K_3 = 1,1$; $\eta_p = 0,73$; $H_p = 540$ м; $\rho = 997$ кг/м³) розрахункова потужність становить $P_o = 19,9$ кВт.

Двигуни, які встановлюються у приміщеннях водонасосних станцій [1; 3; 9, 13], повинні мати закрите або основне виконання з вологостійкою ізоляцією типу F, а для

забезпечення широкого діапазону регулювання швидкості – мати одну пару полюсів. Таким чином, двигун повинен бути призначений для роботи в помірному кліматі, у закритих приміщеннях з природною вентиляцією – ступінь захисту IP54, виконання У2. Виходячи з отриманого значення P_o та накладених обмежень обираємо найближчу більшу стандартну потужність двигуна P_n , орієнтуючись на трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором [4; 5; 12; 14; 15]. Найближчим до заданих параметрів є асинхронний двигун серії 5А основного виконання, ступінь захисту IP54, клас ізоляції «F», $U_n = 380$ В типу АИР-180S2, характеристики якого наведено в табл. 3.

Діючий струм двигуна, А, визначимо за формулою

$$I_o = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}. \quad (18)$$

Коефіцієнт завантаження двигуна визначаємо за формулою

$$K_3 = \frac{P_o}{P_n} = \frac{19,96}{22} = 0,91. \quad (19)$$

Перерахуємо табличні значення ряду параметрів у фактичні з використанням коефіцієнта завантаження $K_3 = 1$; $\cos \varphi_\phi = 0,81$; $\eta_\phi = 82,1\%$. Для розрахунку фактичного струму двигуна, А, використаємо формулу

$$I_\phi = \frac{K_3 \cdot P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_\phi \cdot \eta_\phi}. \quad (20)$$

Здійснимо перерахунок решти параметрів, а результати занесемо до табл. 3.

У літературі [4–8; 11] наведено ряд комп'ютерних або математичних моделей асинхронних двигунів. На рис. 5 наведено фрагмент розробленої нелінійної MathCAD-моделі для дослідження асинхронного двигуна під час прямого пуску з вентиляторним моментом статичного навантаження. Результати моделювання моменту $M(t)$ та кутової швидкості $\omega(t)$ під час пуску асинхронного приводу насоса наведено

на рис. 6. З графіків можна зробити висновок, що двигун дуже швидко, менше ніж за секунду, має вийти на номінальний режим під час пуску, але момент постійно пульсує. Коливання моме-

нту є незначними, але для надійної роботи очи-сних пристроїв бажано мати сталу швидкість та момент на валу двигуна.

Таблиця 3. Технічні характеристики асинхронного двигуна типу АІР-180S2
Table 3. Technical characteristics of the AIR-180S2 asynchronous moto

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення	
		паспортні	приведені
Номінальна потужність P_n	кВт	22	19,95598
Номінальна напруга U_n	В	380	344,6942
Номінальний ККД η_n	%	90,5	82,09165
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n$		0,89	0,80731
Номінальний струм статора I_n	А	41,5	37,64424
Фактичний струм двигуна	А	0,377	0,458
Відношення пускового струму до номінального I_n/I_n		6,8	6,168212
Номінальна швидкість обертання ротора n_n	об./хв	2930	2657,774
Номінальний момент на валу $M_{ном}$	Н·м	72	65,31048
Кратність пускового моменту $M_n/M_{ном}$		2	1,81418
Кратність максимального моменту до номінального M_{max}/M_n		2,9	2,630561
Момент інерції J	кг·м ²	0,063	0,063
Маса m	кг	160	160

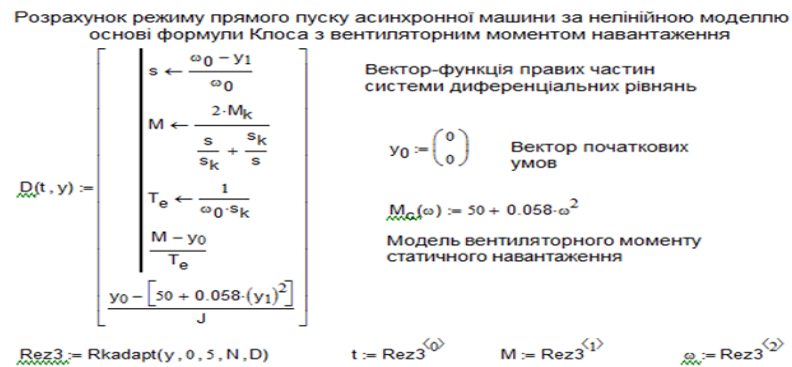


Рис. 5. Фрагмент MathCAD-моделі асинхронного двигуна з вентиляторним моментом навантаження на основі формули Клосса

Fig. 5. A fragment of the MathCAD model of an asynchronous motor with a fan load moment based on the Kloss formula

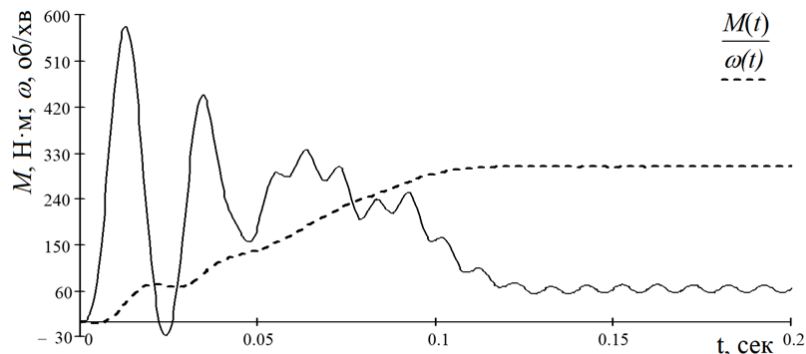


Рис. 6. Результати моделювання моменту $M(t)$ та кутової швидкості $\omega(t)$ під час пуску асинхронного приводу насоса

Fig. 6. Results of simulation of moment $M(t)$ and angular velocity $\omega(t)$ during start-up of asynchronous pump drive

Для проведення дослідження використано математичну модель системи автоматичного керування, наведену на рис. 7. Проведено порівняння роботи розімкненої (рис. 8) та замкненої (рис. 9) систем. Зокрема, аналіз отриманих амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик, а також діаграм Найквіста для розглянутих режимів роботи показав, що для замкненої системи спостерігається підвищення стійкості роботи системи за обраними критеріями. Так, у розімкненій системі поступове зниження амплітуди спостерігається вже при 1 Гц, у той час як у замкненої системі спад амплітуди відбувається на частоті понад 10 Гц.

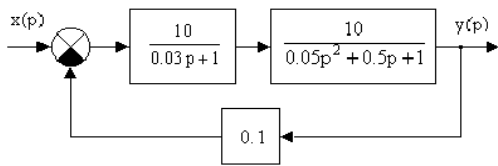


Рис. 7. Математична модель асинхронного приводу

Fig. 7. Mathematical model of asynchronous drive

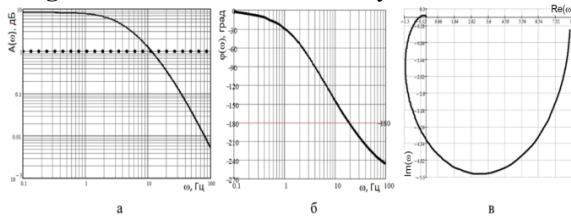


Рис. 8. Логарифмічна амплітудно-частотна (а), фазо-частотна (б) характеристики та діаграма Найквіста (в) розімкненої системи

Fig. 8. Logarithmic amplitude-frequency (a), phase-frequency (б) characteristics and Nyquist diagram (в) of the open system

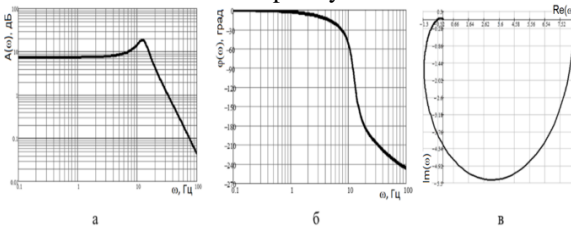


Рис. 9. Логарифмічна амплітудно-частотна (а), фазо-частотна (б) характеристики та діаграма Найквіста (в) замкненої системи

Fig. 9. Logarithmic amplitude-frequency (a), phase-frequency (б) characteristics and Nyquist diagram (в) of the close system

Комп'ютерне моделювання використання ПІ- (рис. 10, а) та ПІІ-регуляторів (рис. 10, б) спочатку показує гарну стабілізацію контрольованого параметра, але з часом відбувається його значне розхитування, що спричинить нестійку роботу всієї системи, причому проведений авторами підбір параметрів інтегральної складової регулятора не дозволив повністю усунути отримані коливання контрольованого параметра.

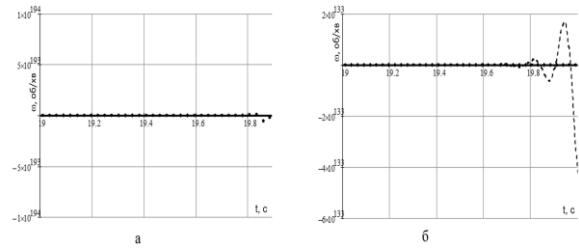


Рис. 10. Перехідні процеси при використанні ПІ-регулятора (а), ПІІ-регулятора (б)

Fig. 10. Transient processes when using the P-controller (a), PI-controller (b)

Під час моделювання роботи ПІІ-регулятора проведено підбір параметрів моделі з метою пришвидшення впливу регулятора на систему та скорочення загального часу стабілізації системи. Результати моделювання (рис. 11) з різними параметрами показали ефективність підбору та підтвердили можливість забезпечити тривалість перехідного процесу близько 0,2 с. Крім того, результати моделювання показують, що стабілізація системи розпочинається одразу після зміни сигналу керування.

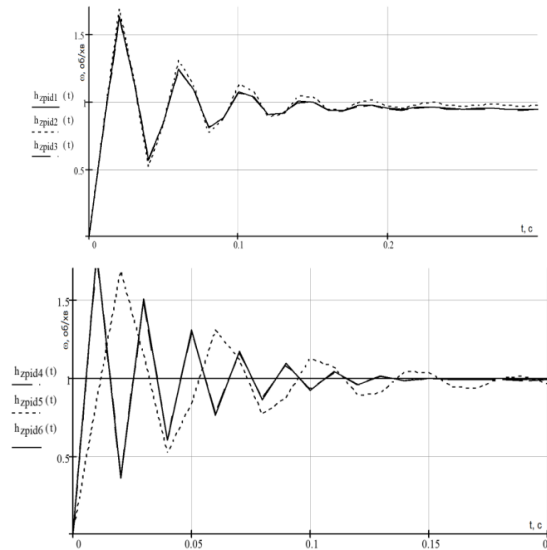


Рис. 11. Перехідні процеси при використанні ПІІ-регулятора з різними параметрами

Fig. 11. Transient processes when using a PID-controller with different parameters

Висновки. Аналіз літературних джерел показав, що при дросельному керуванні насосним агрегатом водоочисної системи зменшення енергоспоживання при зменшенні споживання води практично не відбувається. Розрахунок спожитої потужності, коефіцієнта корисної дії, моменту та швидкості обертання вала як функції витрати води із забезпеченням заданого тиску показав, що оптимальним способом керування асинхронним двигуном насосних установок є частотне керування з повністю відкритою і нерухою заслінкою. Так, спожита потужність відрізняється в 1,57–

22 рази, залежно від рівня споживання води. Водночас встановлено, що в такому режимі керування двигуном збільшення гідравлічного опору системи призводить до зниження економії електроенергії.

За результатами комп'ютерного моделювання прямого пуску асинхронного двигуна з вентиляторним моментом статичного навантаження встановлено, що двигун дуже швидко виходить на номінальний режим роботи, але момент постійно пульсує. Аналіз отриманих у результаті комп'ютерного моделювання діаграм Найквіста, амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик показав підвищення стійкості роботи для замкненої системи керування. Встановлено, що використання П- та ПІ-регуляторів дозволяє стабілізувати перехідні процеси лише на початку, а потім система може піти «в рознос». Водночас використання ПІД-регуляторів дозволяє отримати перехідні процеси тривалістю до 0,2 с.

Бібліографічний список

1. Грабко В. В., Мошноріз М. М. Методи та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання. Вінниця: ВНТУ, 2011. 138 с.
2. Електропривід / О. С. Марченко, Ю. М. Лаврінченко, П. І. Савченко, Є. Л. Жулай. Київ: Урожай, 1995. 260 с.
3. Жулай Є. Л. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній. Київ: Вища освіта, 2001. 288 с.
4. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2004. 428 с.
5. Толочко О. І. Моделювання електро-механічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
6. Шабатура Ю. В., Паранчук Я. С., Чумакевич В. О. Енергозберігаюча система управління трифазними електроприводами військово-технічних комплексів з покращеною електромагнітною сумісністю. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних технічних інформаційних систем: зб. наук. праць*. Житомир, 2009. № 2. С. 140-147.
7. Aayushi A., Aayushi S., Aditya M., Bhavnes J. Speed Control of Three-Phase Induction Motor Using ANFIS and Flower Pollination Algorithm Optimized PI Controller. *International Conference on Advancements in Power, Communication and Intelligent Systems*. Kannur, India, 2024. P. 1-6. doi: 10.1109/APCI61480.2024.10616561.
8. Application of a wavelet neural network approach to detect stator winding short circuits in asynchronous machines / S. Sakhara, M. Brahimi, L. Nacib, T. Layadi. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. Vol. 2023, No 3. P. 21-27. doi: 10.20998/2074-272X.2023.3.03.
9. Design of PID Controllers for Speed Control of Three Phase Induction Motor Based on Direct-Axis Current Coordinate Using IFOC / I. Ferdiansyah, L. Raharja, D. Yanaratri, E. Purwanto. *4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering*. Yogyakarta, Indonesia, 2019. P. 369-372. doi: 10.1109/ICITISEE48480.2019.9003893.
10. Noh M., Najib M., Abdullah N. S. Simulator of Water Tank Level Control System Using PID-Controller. *Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology*. University of Cambridge, 2008. P. 168-171.
11. Paranchuk Y., Evdokimov P., Kuznyetsov O., Electromechanical positioning system with a neuro-fuzzy corrector. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96, No 9. P. 52-55. doi: 10.15199/48.2020.09.11.
12. Paranchuk Y., Kuznyetsov O. Synthesis of the Intelligent Position Controller of an Electromechanical System. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1-4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240889.
13. Role of Ionic Transport in the Electrochemical Activation of Water Solutions / K. Janisz, I. Bordun, V. Ptashnyk, V. Pohrebennyk. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014. Vol. 90, No 1. P. 80-83. doi: 10.12915/pe.2014.01.19.
14. Sakhara S., Salah S., Nacib L. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2017. Vol. 8, No 2. P. 308-317. doi: 10.1007/s13198-016-0435-1.
15. Stable Adaptive Control and Estimation for Nonlinear Systems / J. Spooner, M. Maggiore, R. Ordonez, K. Passino. A John Wiley & Sons, 2002. 539 p.
16. Treatment of sugar processing industry wastewater using copper electrode by electrocoagulation: Performance and economic study / R. K. Patel, R. Shankar, P. Khare, P. Mondal. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2022. Vol. 99, No 8. P. 100563. doi: 10.1016/j.jics.2022.100563.
17. Yadav M., Yadav R. K., Gole V. L. Sugar industry wastewater treatment: Current practices and advances. *Microbial Ecology of Wastewater Treatment Plants*. 2021. P. 151-174. doi: 10.1016/B978-0-12-822503-5.00017-5.

Стаття надійшла 15.05.2024