

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.10

УДК 621.313.323

**Нізімов В.Б.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4580-5262, e-mail: vikbor36@gmail.com

**Чугунов Д.В.**, здобувач другого (магістерського) рівня, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Nizimov Victor**, Doctor of technical sciences, Professor, manager of the Department of Electrical and Mechanical Engineering Department

**Chugunov David**, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЗМІННОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ

*У роботі розв'язана актуальна наукова задача, яка полягає в розробці і теоретичних та експериментальних дослідженнях пристроїв для покращення енергетичних показників несиметричних збуджувачів синхронних машин. Метою роботи є покращення енергетичних показників шляхом зменшення споживання реактивної потужності та амплітуд гармонійних складових. Наведена принципова схема збуджувача з примусовою ємнісною комутацією тиристорів. Для дослідження гармонійного складу використовується експериментально отримані залежності форсованої напруги збудження, які розкладаються у ряд Фур'є. Наведені амплітудні спектри напруги збудження при природній та примусовій комутації тиристорів. Проведеними експериментами доведена доцільність використання розробленого збуджувача з примусовою ємнісною комутацією.*

**Ключові слова:** синхронна машина; несиметричний збуджувач; примусова комутація.

*An actual scientific task that consists in development and theoretical and experimental researches devices for the improvement of power indexes asymmetrical exciters of synchronous machines is in-process untied. The aim of work is an improvement of power indexes by reduction of consumption reactive-power and amplitudes of harmonious constituents. The brought fundamental chart over of exciter with a force capacity commutation of thyristors. For research of harmonious composition used the experimentally got dependences of a force tension excitations that is laid out in the row Fourier. The brought peak spectrums over tension of excitation during natural and force commutation of thyristors. By the conducted experiments the well-proven expediency of the use of the worked out exciter with force capacity commutation.*

**Keywords:** synchronous machine; asymmetrical exciter; force commutation.

### Постановка проблеми

Вода — це найважливіше джерело для життя людства. Споживачами води є промисловість, сільське господарство та життєдіяльність людства.

Джерело води — це водосховища, річки та озера.

Протягом доби, місяця чи року відбувається зміна споживання води. Для забезпечення необхідних параметрів (тиску, продуктивності), їх слід регулювати. Регулювання продуктивності води забезпечується використанням засувки, або швидкістю обертання робочого колеса насосу. У деяких випадках можливо підключення на паралельну роботу (при наявності) значної кількості насосів. Для забезпечення надійного водопостачання необхідна математична модель насосного агрегату, який працює у режимі змінної продуктивності.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Переважна більшість досліджень присвячена економії електроенергії [1], технічним даним насосного агрегату [2, 3], методам регулювання та схемотехнічним рішенням із застосуванням різноманітних електроприводів [4, 5, 6,7]. Однак відсутні публікації, що пов'язані із математичними

моделями насосного агрегату (НА), які працюють у режимах змінної продуктивності. Тому актуальною технічною задачею є розробка математичної моделі насосного агрегату у режимах змінної продуктивності при регулюванні засувкою та швидкістю обертання робочого колеса.

#### Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — розробка математичної моделі насосного агрегату у режимах змінної продуктивності з частотно-керованим електроприводом змінного струму.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

Для дослідження змінної продуктивності розроблена математична модель НА з частотно-керованим асинхронним двигуном. Часова діаграма зміни продуктивності насосного агрегату наведена на рис.1.

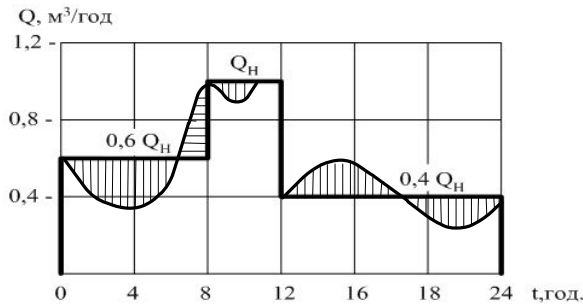


Рис. 1. Часова діаграма зміни продуктивності насосного агрегату

Крива змінної продуктивності апроксимована методом рівних площин таким чином, що при  $t_1 = 0 \dots 8$  год,  $Q = 0,6 Q_H$ ; при  $t_2 = 8 \dots 12$  год,  $Q = Q_H$ ; при  $t_3 = 12 \dots 24$  год,  $Q = 0,4 Q_H$ .

Для моделювання режиму змінної продуктивності обираємо насос типу 9 КсВ з наступними технічними даними:

продуктивність, м<sup>3</sup>/год  $Q_H = 225$  м<sup>3</sup>/год = 0,0625 м<sup>3</sup>/с  
 напір, кгс/м<sup>2</sup>  $H_H = 210$  кгс/м<sup>2</sup>  
 напір при нульовій продуктивності, кгс/м<sup>2</sup>  $H_0 = 280$  кгс/м<sup>2</sup>  
 ККД  $\eta_H = 0,75$   
 швидкість, об/хв.  $n_H = 1480$  об/хв.  
 статичний напір  $H_{ст} = 20$

На рис. 2 наведена функціональна схема системи ПЧ-АД.

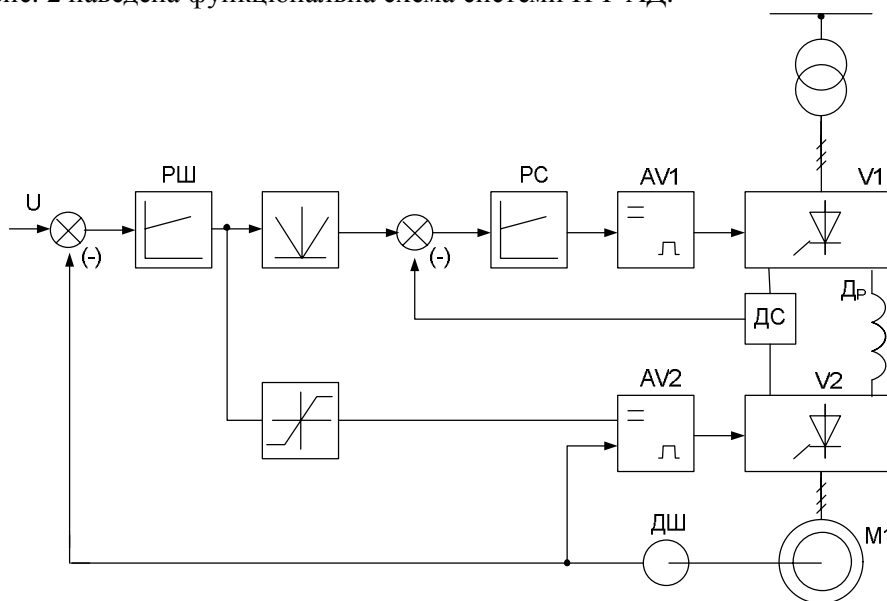


Рис. 2. Функціональна схема електропривода за системою ПЧ-АД

Залежність напору насосу від продуктивності при заданій швидкості обертання робочого колеса

$$H_H = H_0 - R_H \cdot Q_H^2.$$

Номинальний опір насоса при номинальному тиску та продуктивності за виразом

$$R_H = \frac{H_0 - H_H}{(Q_H)^2}.$$

Залежність конкретного значення продуктивності від напору НА

$$H_X = H_0 - R_H \cdot Q_X^2.$$

$Q_X, \text{м}^3 / \text{с}$	$0 \cdot Q_H$	$0,2 \cdot Q_H$	$0,4 \cdot Q_H$	$0,6 \cdot Q_H$	$0,8 \cdot Q_H$	$1 \cdot Q_H$	$1,2 \cdot Q_H$
$H_X, \text{м}$	280	277.2	268.8	254.8	235.2	210	179.2

Характеристика мережі при регулюванні засувкою

$$H_X = H_{CT} + R_M \cdot Q_X^2, \quad (1)$$

де  $R_M$  — опір мережі при номинальній продуктивності.

Опір мережі при  $Q_X$  і  $H_X$  визначається

$$R_X = \frac{H_X - H_{CT}}{(Q_X)^2}.$$

Для точки А при  $Q_n = 225 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,063 \text{ м}^3 / \text{с}$ .

$Q_X, \text{м}^3 / \text{с}$	$0 \cdot Q_H$	$0,2 \cdot Q_H$	$0,4 \cdot Q_H$	$0,6 \cdot Q_H$	$0,8 \cdot Q_H$	$1 \cdot Q_H$	$1,2 \cdot Q_H$
$H_A, \text{м}$	20	27,6	50,4	88,4	141,6	210	293,6

Для точки В при  $Q_n = 225 \cdot 0,4 = 90 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,025 \text{ м}^3 / \text{с}$ .

$Q_X, \text{м}^3 / \text{с}$	$0 \cdot Q_H$	$0,2 \cdot Q_H$	$0,3 \cdot Q_H$	$0,4 \cdot Q_H$	$0,6 \cdot Q_H$
$H_B, \text{м}$	20	29.952	42.392	59.808	109.568

Для точки С при  $Q_n = 225 \cdot 0,6 = 135 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,038 \text{ м}^3 / \text{с}$ .

$Q_X, \text{м}^3 / \text{с}$	$0 \cdot Q_H$	$0,2 \cdot Q_H$	$0,4 \cdot Q_H$	$0,6 \cdot Q_H$	$0,8 \cdot Q_H$
$H_C, \text{м}$	20	29,365	57,46	104,284	169,839

Характеристика мережі при регулюванні продуктивності обертанням робочого колеса, частота обертання двигуна визначається за виразом:

$$\omega_X = \omega_H \cdot \sqrt{\frac{H_X}{H_H}}, \quad c^{-1}, \quad (2)$$

$$\text{де: } \omega_H = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1480}{30} = 155 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_1 = 155 \cdot \sqrt{\frac{210}{210}} = 155 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_2 = 155 \cdot \sqrt{\frac{50,4}{210}} = 75,888 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_3 = 155 \cdot \sqrt{\frac{88,4}{210}} = 100,505 \text{ с}^{-1}.$$

Розрахункові залежності наведені на рис. 3.

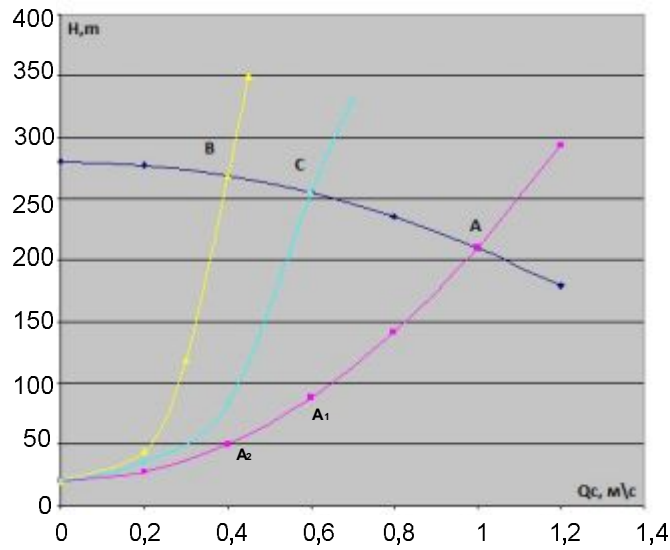


Рис. 3. Характеристика вентиляторної установки при регулюванні продуктивності засувкою (точки A,B,C), та швидкістю обертання робочого колеса (точки A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>)

В основу математичної моделі покладена залежність продуктивності від швидкості обертання робочого колеса, або опору мережі

$$Q = \sqrt{\frac{H_0 v^2 - H_{CT}}{R_M + R_{нас}}}, \quad (3)$$

де  $H_{CT}$  — статичний напір при нульовій продуктивності;  $v = \frac{\omega}{\omega_n}$  — відносна швидкість обертання робочого колеса.

Структурна схема лінеаризованої моделі насосного агрегату з частотним керуванням АД наведена на рис. 4. На рис. 5 та 6 представлені перехідні процеси регулювання швидкості засувкою та регулювання швидкості обертанням робочого колеса.

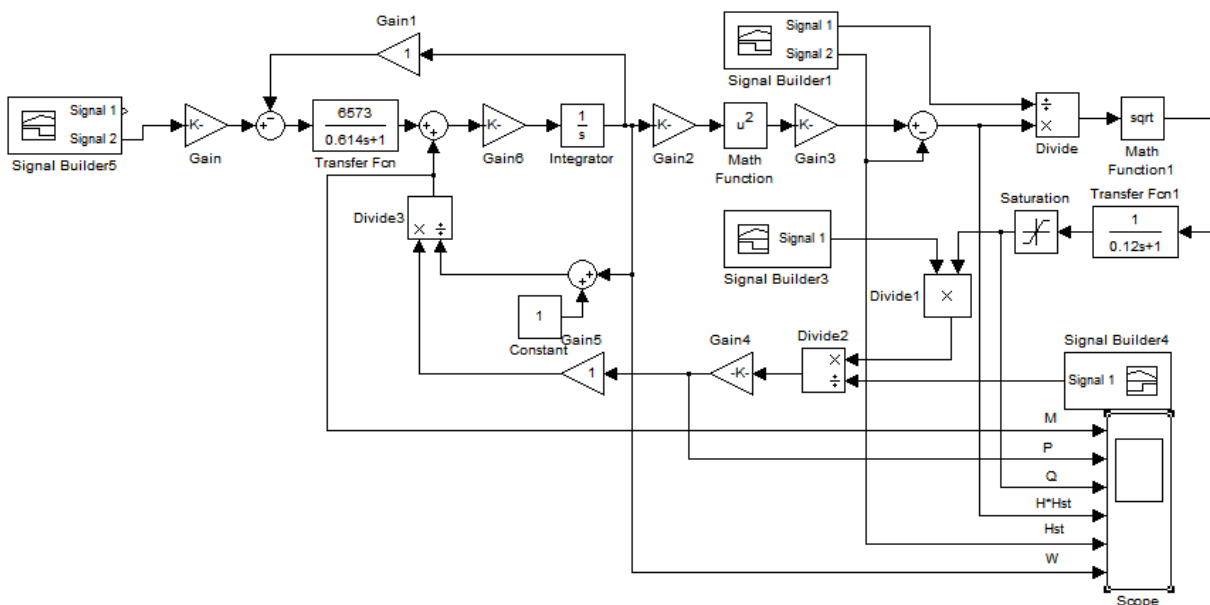


Рис. 4. Структурна схема лінеаризованої моделі насосного агрегату з частотним керуванням АД

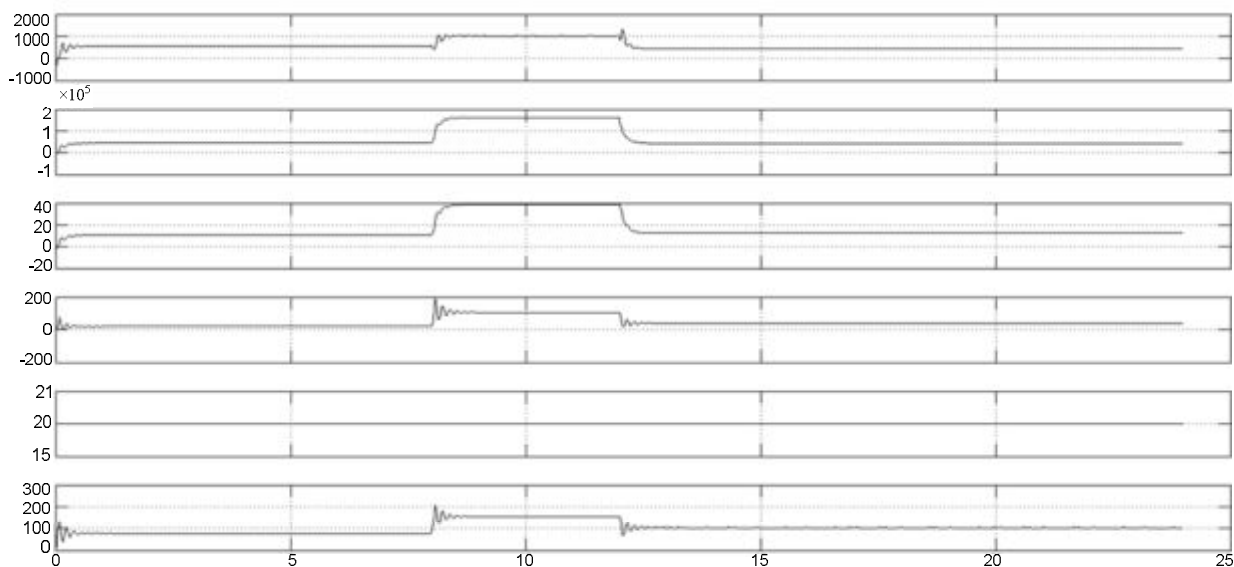


Рис. 5. Регулювання продуктивності обертанням робочого колеса НА

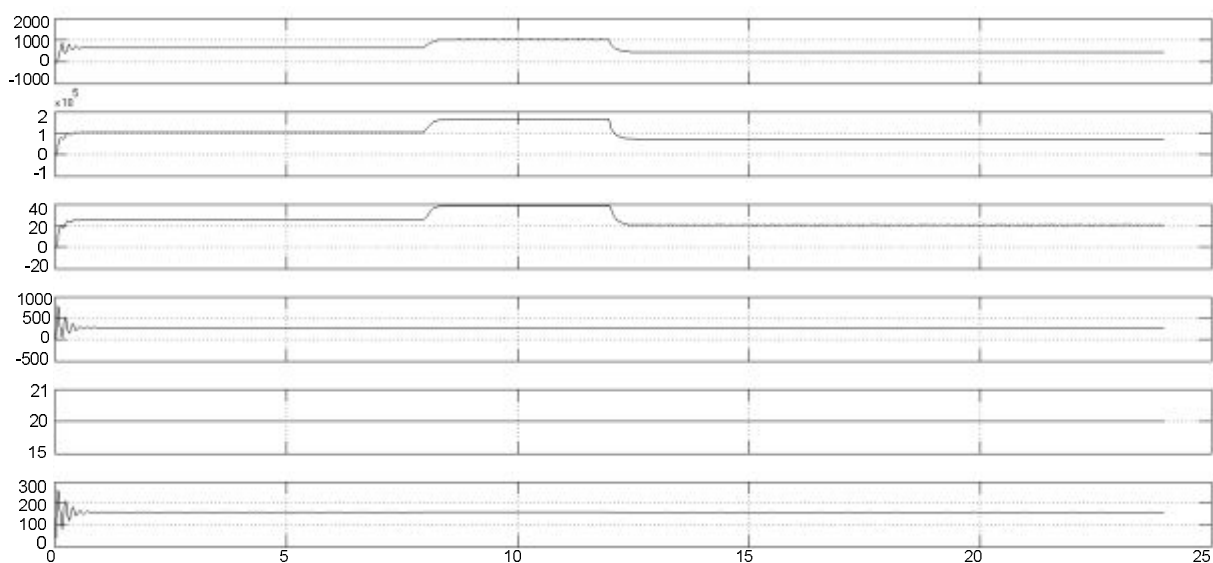


Рис. 6. Регулювання продуктивності засувкою НА

Визначення добових витрат електроенергії розраховується на підставі результатів моделювання режимів регулювання продуктивності насосного агрегату.

Добові витрати електроенергії при регулюванні продуктивності засувкою визначаються за формулою

$$W_1 = P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3, \text{ кВт}, \quad (4)$$

де  $W_1$  — добові витрати електроенергії,  $P_1, P_2, P_3$  — потужність, яка спожита насосним агрегатом за час роботи  $t_1, t_2, t_3$ .

Потужність, яка спожита насосним агрегатом за час роботи  $t_1, t_2, t_3$

$$P_n = g \cdot \frac{H_n \cdot Q_n}{\eta_n}, \quad (5)$$

де  $P_1 = 6,18 \cdot 10^5$  кВт·год;  $P_2 = 3,164 \cdot 10^5$  кВт·год;  $P_3 = 4,499 \cdot 10^5$  кВт·год при наступних значеннях:

$H_1=210$ м	$Q_1=225$ м/с	$t_1=8$	$\eta=0,75$
$H_2=268,8$ м	$Q_2=90$ м/с	$t_2=4$	
$H_3=254,8$ м	$Q_3=135$ м/с	$t_3=12$	

Отже  $W_1 = 9,869 \cdot 10^5$  кВт·год.

Добові витрати електроенергії при регулюванні продуктивності швидкістю обертання робочого колеса визначаються за формулою

$$W_2 = P'_1 t_1 + P'_2 t_2 + P'_3 t_3, \text{ кВт}, \quad (6)$$

де:  $W_2$  — добові витрати електроенергії,  $P'_1, P'_2, P'_3$  — потужність, яка спожита насосним агрегатом за час роботи  $t_1, t_2, t_3$ .

Потужність, яка спожита насосним агрегатом за час роботи  $t_1, t_2, t_3$

$$P = g \cdot \frac{H' \cdot Q}{\eta'}, \quad (7)$$

де  $P'_1 = 6,18 \cdot 10^5$  кВт·год;  $P'_2 = 2,206 \cdot 10^5$  кВт·год;  $P'_3 = 1,6 \cdot 10^5$  кВт·год при наступних значеннях:

$H'_1 = 210$ м	$Q_1 = 225$ м/с	$t_1 = 8$	$\eta'_1 = 0,75$	$\omega = 154,907$ м/с	$V'_1 = \omega_1/\omega = 1$
$H'_2 = 268,8$ м	$Q_2 = 90$ м/с	$t_2 = 4$	$\eta'_2 = 0,49$	$\omega_1 = 154,907$ м/с	$V'_2 = \omega_2/\omega = 0,49$
$H'_3 = 254,8$ м	$Q_3 = 135$ м/с	$t_3 = 12$	$\eta'_3 = 0,615$	$\omega_2 = 75,888$ м/с	$V'_3 = \omega_3/\omega = 0,649$
				$\omega_3 = 100,505$ м/с	

Отже  $W_2 = 6,4 \cdot 10^6$  кВт·год.

Різниця добових витрат електроенергії становить

$$\Delta W_D = W_1 - W_2 = 3,844 \cdot 10^6 \text{ кВт·год.}$$

Різниця річних витрат електроенергії становить

$$\Delta W_P = \Delta W_D \cdot T = 1,403 \cdot 10^9 \text{ кВт·год,}$$

де  $T = 365$  днів на рік.

### Висновки

На підставі сумісного рішення залежностей напірно-витратні характеристики насосного агрегату та мережі складена математична модель змінної продуктивності в функції часу з частотно-керованим асинхронним двигуном.

Застосування розробленої моделі дозволяє регулювання продуктивності у функції часу за допомогою засувки або швидкості обертання робочого колеса.

Виконано порівняльна оцінка споживання електричної енергії при регулюванні продуктивності за допомогою засувки і швидкості обертання робочого колеса насосного агрегату.

### Список використаної літератури

1. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
2. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергия, 1977. 424 с.
3. Карасев Б.В. Насосы и насосные станции. Минск: Вишэйшая школа, 1979. 285 с.
4. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972. 240 с.
5. Контаутас Р.К. Электропривод для насосных станций. *Жилищное и коммунальное хозяйство*. 1985. №8. С. 29–31.
6. Гинзбург Я.Н., Лезнов Б.С., Чебанов В.Б. Внедрение автоматизированных систем регулируемого электропривода в насосные установки // *Автоматизация и управление системами водоснабжения и водоотведения*. М. 1986. С.106–109.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

## MATHEMATICAL MODEL OF VARIABLE PRODUCTIVITY PROCESS PUMP UNIT OF THE WATER SUPPLY SYSTEM

### Abstract

The paper solves an actual scientific problem, which consists in the development of a mathematical model of the pumping unit in the variable performance mode. Built compatible characteristics-contacts of the pump unit and the network according to the load schedule when adjusting the performance by the valve and the speed of rotation of the impeller. The functional scheme of the electric drive according to the CF-AM system is given. The purpose of the study is to develop a mathematical model of a pump unit in variable performance modes with a frequency-controlled electric drive of alternating current to ensure the necessary parameters (pressure, performance) and reliable water supply to consumers in general. The structural diagram of the linearized model of the pumping unit was developed. A comparative evaluation of the simulation results was performed when adjusting the variable productivity by the valve and the speed of the impeller. From the above results of mathematical modelling, it was determined that the application of the developed model allows the regulation of productivity as a function of time using a latch or the speed of rotation of the impeller.

### References

- [1] Leznov B.S. (1991) *E`konomiya e`lektroe`nergii v nasosny`x ustanovkax [Energy saving in pump installations]*. Moscov. E`nergoatomizdat, 1991. 144 p. [in Russian].
- [2] Cherkasskij V.M. (1977) *Nasosy`, ventilyatory`, kompressory` [Pumps, fans, compressors]*. Moscov. E`nergiya, 1977. 424 p. [in Russian].
- [3] Karasev B.V. (1979) *Nasosy` i nasosny`e stancii [Pumps and pumping stations]*. Minsk: Vishe`jshaya shkola. 285 p. [in Belarus`].
- [4] Onishhenko G.B., Yun`kov M.G. (1972) *E`lektroprivod turbomehanizmov [Electric drive of turbomechanisms]*. Moscov. E`nergiya, 1972. 240 p. [in Russian].
- [5] Kontautas R.K. (1985) *E`lektroprivod dlya nasosny`x stancij [Electric drive for pumping stations]*. Zhilishhnoe i kommunal`noe xozyajstvo. 1985. № 8. P. 29–31. [in Russian].
- [6] Ginzburg Ya.N., Leznov B.S., Chebanov V.B. (1986) *Vnedrenie avtomatizirovanny`x sistem reguliruemogo e`lektroprivoda v nasosny`e ustanovki [Implementation of automated systems of adjustable electric drive in pump installations]*. Avtomatizaciya i upravlenie sistemami vodosnabzheniya i vodootvedeniya. Moscov. 1986. P.106–109. [in Russian].
- [7] Sy`romyatnikov I.A. (1984) *Rezhimy` raboty` asinxronny`x i sinxronny`x dvigatelej [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]*. Moscov. E`nergoatomizdat, 1984. 240 p. [in Russian].

Надійшла до редколегії 21.02.2023