

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ НАСОСІВ З ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

Орест Вербовський¹, Ігор Попадюк², Вадим Орел³, Віталій Макарчук⁴

Національний університет «Львівська політехніка»
12, вул С. Бандери, м. Львів, Україна, 79013

¹канд. тех. наук, доцент, orest.v.verbovskiy@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-0410-7871

²канд. тех. наук, доцент, ihor.y.popadiuk@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-8811-7988

³канд. тех. наук, доцент, vadyim.i.orel@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-3518-4597

⁴vitalii.makarchuk.bd.2020@lpnu.ua, orcid.org/0009-0004-1286-3791

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.44.11-18

Анотація. Для розроблення експериментального стенду для випробування насосів проведено літературний огляд. Встановлено, що частотне регулювання є одним з кількісних енергоощадних способів керування роботою насосної установки. При цьому вплив на насосний агрегат здійснюють зміною робочої точки насоса при зміні положення його характеристики. Гідравлічні схеми для експериментального дослідження насосів з частотним регулюванням, наведені в статті, мають певні недоліки: 1) розташування насоса відносно резервуара є неоднозначним щодо роботи насоса під заливом; 2) регулювання тиску передбачено лише в бік його зменшення; 3) стосується радше автоматизації насосних установок. На розробленому та виготовленому експериментальному стенді передбачено можливість дослідження роботи насоса з використанням частотного перетворювача та без нього, через байпасну лінію. При випробуванні насоса для систем, які працюють по рівню рідини у всмоктувальному баку, використовують або вентиль на нагнітальному трубопроводі (з використанням частотного перетворювача), або кульовий кран на скидному трубопроводі від нагнітального баку (без використання частотного перетворювача). Крім того, випробування насоса при використанні частотного перетворювача можна проводити для систем, які працюють по тиску. Встановлений частотний перетворювач є регулятором витрати робочої рідини, що дозволяє регулювати такий параметр насоса як подачу. Насос, запроектований на експериментальному стенді, є струменевим самовсмоктувальним, що не потребує встановлення його під заливом. Нагнітальний бак розташований вище за всмоктувальний бак, що забезпечує циркуляцію робочої рідини гравітаційно. Робочою рідиною слугуватиме вода. Попередні результати, виконані на експериментальному стенді, підтверджують можливість частотного регулювання насоса з використанням частотного перетворювача.

Ключові слова: експериментальний стенд, насос, частотне регулювання, змінна частота, характеристика насоса.

ВСТУП

У різних галузях промисловості, енергетики, сільського та комунального господарств широко використовують насосні установки. Особливе значення має їхнє застосування у системах водопостачання й каналізації, де вони є одним з основних вузлів.

Споживання енергії в усьому світі зростає загрозливими темпами [1]. На насосні

агрегати припадає майже 21% світового споживання електроенергії. Середній потенціал економії енергії, який можна досягти за допомогою регулювання насосної системи, становить близько 30% [2].

При експлуатації насосів часто доводиться регулювати їх параметри – подачу і напір. Оптимальна роботи насосів полягає в мінімізації затрат на перепомповування рідин [3].

Регулювання роботи насосної установки можна здійснювати зокрема впливом на насосний агрегат зміною положення характеристики насоса [4].

Існують такі способи регулювання роботи насосної установки: дроселювання, обточування робочого колеса, перепуск робочої рідини, регулювання, поворот лопатей робочого колеса насоса, закручування потоку перед робочим колесом, зміна частоти обертання робочого колеса.

Зміна подачі насоса за допомогою регульованого електроприводу є кількісним способом регулювання режиму роботи насосних установок [5].

При регулюванні роботи насосів з використанням частотного регулятора змінюється положення робочої точки насоса [6]. При цьому споживається менша кількість електроенергії порівняно з іншими способами регулювання [1].

Розглянемо деякі схеми з частотним регулюванням насосних агрегатів.

Зі схеми стенду для випробування відцентрових насосів, електродвигун яких обладнано частотним регулятором (рис. 1) [7], не зрозуміло, як розташований насос відносно резервуару, тобто чи має працювати насос під заливом, чи ні.

При стабілізації напору в диктуючій точці водопровідної мережі регулювання тиску проводять лише в бік його зменшення за допомогою відповідних систем автоматизованого керування, укомплектованих, наприклад пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором (рис. 2) [8, 107].

Схему лабораторного стенду для експериментального дослідження насосних установок (рис. 3) [9] наведено більше з точки зору автоматизації ніж як гідравлічну.

МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є розроблення та виготовлення експериментального стенду для випробування насосів з частотним регулюванням.

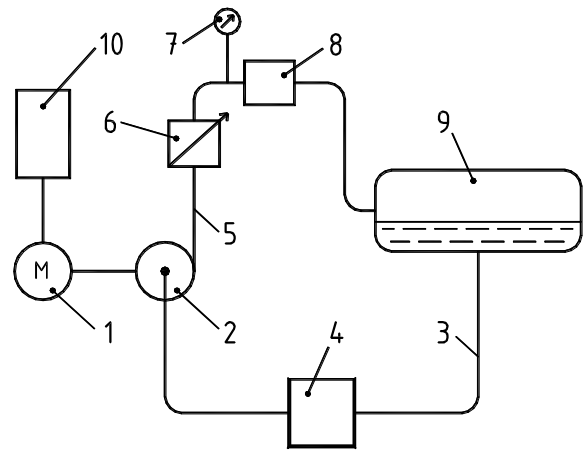


Рис. 1. Схема випробування відцентрових насосів: 1 – асинхронний електродвигун; 2 – насос; 3 – всмоктувальний трубопровід; 4 – фільтр; 5 – напірний трубопровід; 6 – лічильник води; 7 – манометр; 8 – пульт керування гідросистемою; 9 – резервуар; 10 – частотний регулятор

Fig. 1. Schematic diagram of centrifugal pumps test: 1 – asynchronous motor; 2 – pump; 3 – suction pipeline; 4 – filter; 5 – delivery pipeline; 6 – water meter; 7 – pressure gauge; 8 – hydraulic system control panel; 9 – tank; 10 – frequency drive

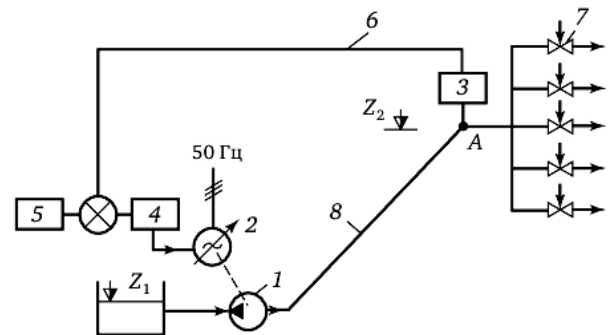


Рис. 2. Схема стабілізації напору в диктуючій точці водопровідної мережі: 1 – відцентровий насос; 2 – регульований електродвигун; 3 – давач тиску; 4 – ПІ-регулятор; 5 – задавальний пристрій; 6 – канал зв'язку; 7 – водорозбірний пристрій; 8 – напірний трубопровід

Fig. 2. Schematic diagram of pressure stabilization in calculation point of water supply network: 1 – centrifugal pump; 2 – electric control drive; 3 – pressure sensor; 4 – proportional integral (PI) controller; 5 – setting device; 6 – communication channel; 7 – water intake device; 8 – delivery pipeline

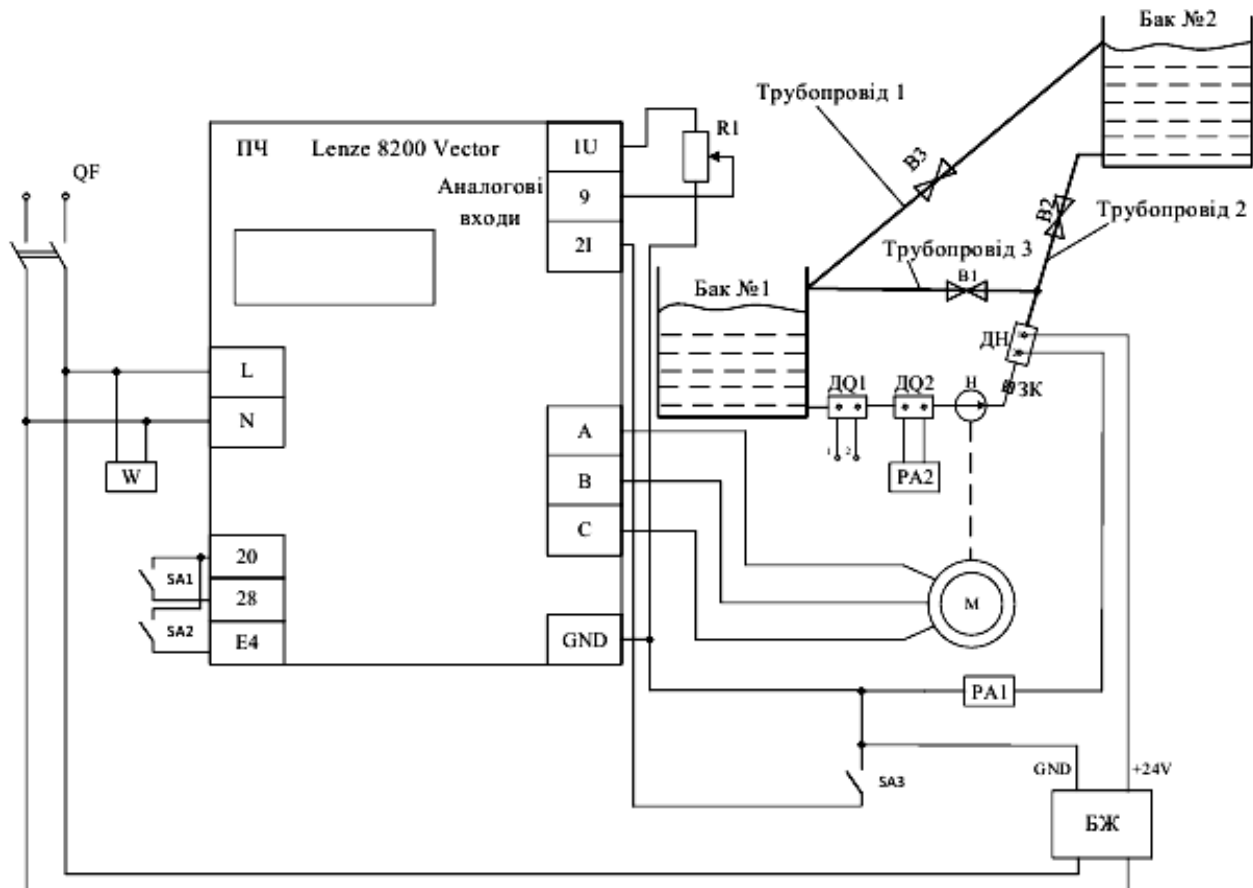


Рис. 3. Функціональна схема лабораторного стенду: QF – автоматичний вимикач; ПЧ – перетворювач частоти; W – мультиметр; SA1 – перемикач для дозволу на роботу насоса; SA2 – перемикач для забезпечення реверсу насоса; SA3 – перемикач для вибору замкненої системи керування; R1 – потенціометр; ДQ1 – імпульсний давач витрат; ДQ2 – витратомір; ДН – давач тиску; Бак №1, Бак №2 – резервуар; ЗК – зворотній клапан; В1, В2, В3 – кран (вентиль); PA1 – мультиметр; PA2 – міліамперметр; М – асинхронний двигун; Н – насос; БЖ – блок живлення

Fig. 3. Functional schematic diagram of lab-scale test-bed: QF – automatic switch; ПЧ – frequency converter; W – multimeter; SA1 – change-over switch to allow the pump to run; SA2 – change-over switch to ensure pump reversal; SA3 – change-over switch to select closed control system; R1 – potentiometer; ДQ1 – impulse flow sensor; ДQ2 – flowmeter; ДН – pressure sensor; Бак №1, Бак №2 – tank; ЗК – back valve; В1, В2, В3 – tap (valve); PA1 – multimeter; PA2 – milliammeter; М – asynchronous motor; Н – pump; БЖ – power supply

КОНСТРУЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ

Експериментальний стенд запроєктовано на базі навчальної лабораторії гідравліки кафедри гідротехніки та водної інженерії Національного університету "Львівська політехніка" (рис. 4). Робочою рідиною є вода.

Стенд працює так. Насос 5 забирає воду зі всмоктувального бака 1 та подає у нагнітальний бак 16. Вода скидним трубопрово-

дом 18 з нагнітального бака 16 надходить у всмоктувальний бак 1.

Насос 5 є струменевим самовсмоктувальним одноступінчастим марки Willo Initial JET 9-4, що не потребує встановлення його під заливом. Вісь насоса відповідає позначці $Z_2 = 0,290$ м.

Баки 1 та 16 об'ємом 2 м^3 кожен мають позначки днищ відповідно $Z_1 = 0,000$ м та $Z_3 = 3,615$ м. Це забезпечує циркуляцію робочої рідини гравітаційно.

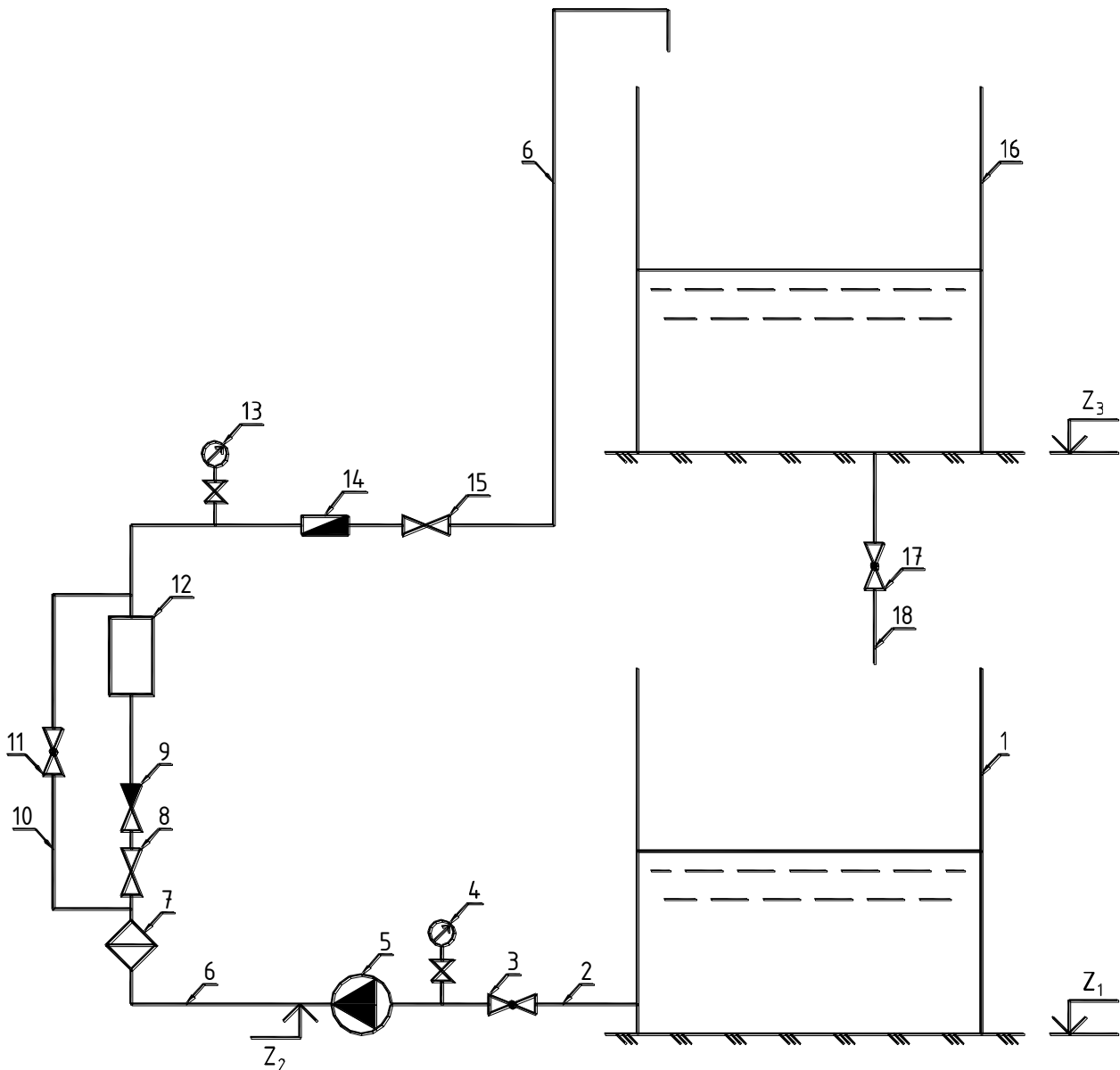


Рис. 4. Схема експериментального стенду: 1 – всмоктувальний бак; 2 – всмоктувальний трубопровід; 3 – кульовий кран; 4 – вакуумметр; 5 – насос; 6 – нагнітальний трубопровід; 7 – фільтр; 8 – вентиль; 9 – зворотний клапан; 10 – байпасна лінія; 11 – кульовий кран; 12 – частотний перетворювач; 13 – манометр; 14 – лічильник води; 15 – вентиль; 16 – нагнітальний бак; 17 – кульовий кран; 18 – скидний трубопровід

Fig. 4. Schematic diagram of experimental test-bed: 1 – suction tank; 2 – suction pipeline; 3 – ball valve; 4 – vacuum gauge; 5 – pump; 6 – delivery pipeline; 7 – filter; 8 – valve; 9 – back valve; 10 – bypass; 11 – ball valve; 12 – frequency converter; 13 – pressure gauge; 14 – water meter (flowmeter); 15 – valve; 16 – delivery tank; 17 – ball valve; 18 – discharge pipeline

На всмоктувальному трубопроводі 2 встановлено вакуумметр 4, на нагнітальному трубопроводі 6 – манометр 13.

На нагнітальному трубопроводі 6 встановлено частотний перетворювач 12 марки Wilo-ElectronicControl MM9. Він дозволяє підтримувати попередньо налаштоване значення тиску незалежно від подачі насоса

4 [10] та одночасно є регулятором витрати робочої рідини.

Лічильником води 14 марки Gross ETW-UA 20Г/130 вимірюють її кількість.

На експериментальному стенді можна досліджувати роботу насоса 4 з використанням частотного перетворювача 12 та без нього, через байпасну лінію 10. При випро-

буванні насоса 4 для систем, які працюють по рівню рідини у всмоктувальному баку 1, використовують або вентиль 8 на нагнітальному трубопроводі 6 (з використанням частотного перетворювача 12), або кульовий кран 17 на скидному трубопроводі 18 (без використання частотного перетворювача 12). Крім того, при використанні частотного перетворювача 12 випробування насоса 4 можна проводити для систем, які працюють по тиску.

Розглянемо дослідження роботи насоса з використанням частотного перетворювача.

Дослідження роботи насоса для систем, які працюють по рівню рідини у всмоктувальному баку, планується виконувати в такій послідовності:

1. Перекрити кульовий кран 11 на байпасній лінії 10.
2. Відкрити кульовий кран 3 на всмоктувальному трубопроводі 2.
3. Увімкнути насос 4.
4. Відкрити вентиль 8 на нагнітальному трубопроводі 6.
5. Відкрити повністю вентиль 15 на нагнітальному трубопроводі 6.

6. Увімкнути електронний блок регулювання частотного перетворювача 12 за допомогою кнопки (рис. 5, поз. 1) на панелі керування.

7. Увімкнути автоматичний режиму роботи електронного блока регулювання частотного перетворювача 12 за допомогою кнопки (рис. 5, поз. 2) на панелі керування.

8. Налаштувати постійний тиск електронного блока регулювання частотного перетворювача 12 на певне значення в межах напору, що створює насос 4 за допомогою групи кнопок (рис. 5, поз. 3) на панелі керування.

9. Зняти покази тиску з дисплею на панелі керування (рис. 5, поз. 4) електронного блока регулювання частотного перетворювача 12.

10. Зняти покази об'єму води з лічильника 14 за певний час.

11. Виконати дії за пп. 9-10 при 3-4 інших ступенях відкриття вентиля 8 за умови, щоб робоча точка насоса для його нормальної роботи була б у дозволений робочій області (рис. 6), між зонами 1 (при малій подачі) та 2 (при великій подачі) [11].

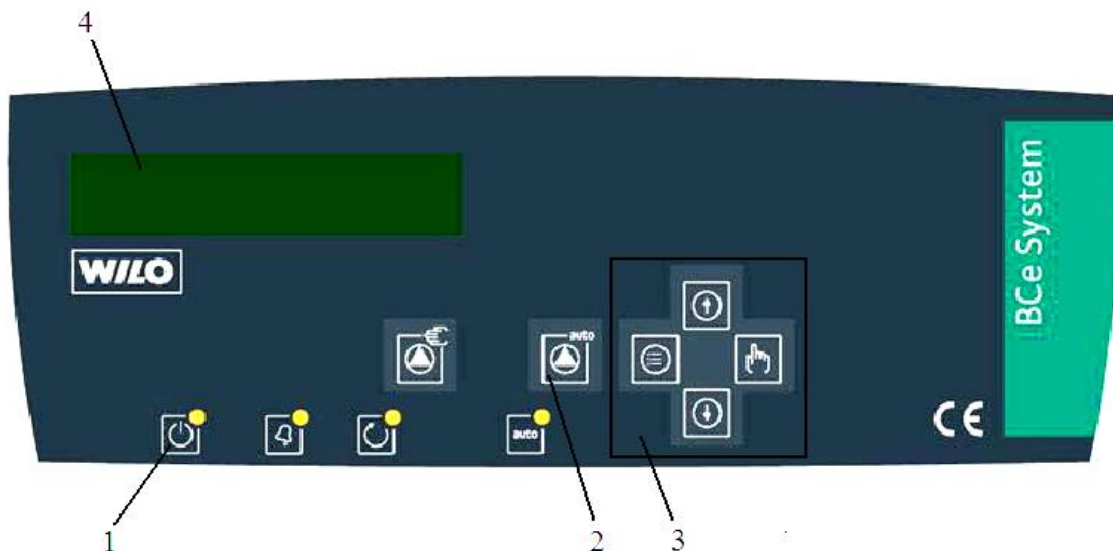


Рис. 5. Схема панелі керування електронного блока регулювання частотного перетворювача: 1 – кнопка вмикання електронного блока регулювання; 2 – кнопка режиму роботи «ручний/автоматичний»; 3 – кнопки налаштування значення постійного тиску; 4 – дисплей

Fig. 5. Scheme of user interface of Wilo-ElectronicControl: 1 – inverter ON; 2 – operating mode Hand/Auto; 3 – setting a constant pressure value; 4 – display

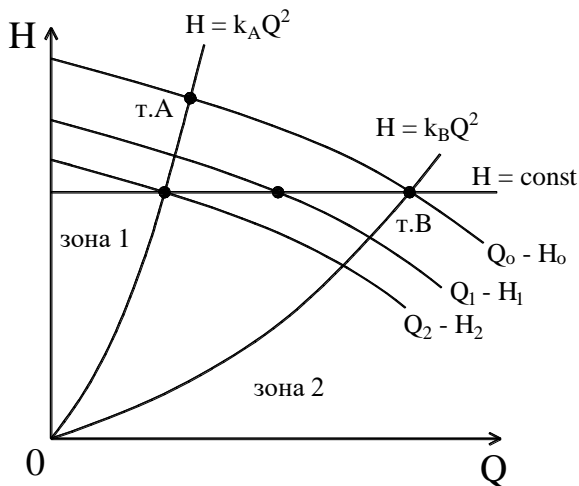


Рис. 6. Зміна характеристика насоса з частотним керуванням у системі, яка працює по тиску

Fig. 6. Change in pump characteristics with frequency control under condition of maintenance of

Дослідження роботи насоса для систем, які працюють по тиску, планується виконувати в такій послідовності:

1. Перекрити кульовий кран 11 на байпасній лінії 10.
2. Відкрити кульовий кран 3 на всмоктувальному трубопроводі 2.
3. Увімкнути насос 4.
4. Відкрити повністю вентиль 8 на нагнітальному трубопроводі 6.
5. Відкрити вентиль 15 на нагнітальному трубопроводі 6.
6. Увімкнути електронний блок регулювання частотного перетворювача 12 за допомогою кнопки (рис. 5, поз. 1) на панелі керування.
7. Увімкнути автоматичний режим роботи електронного блока регулювання частотного перетворювача 12 за допомогою кнопки (рис. 5, поз. 2) на панелі керування.
8. Налаштувати постійний тиск електронного блока регулювання частотного перетворювача 12 на певне значення в межах напору, що створює насос 4 за допомогою групи кнопок (рис. 5, поз. 3) на панелі керування.
9. Зняти покази тиску з дисплею на панелі керування (рис. 5, поз. 4) електронного блоку регулювання частотного перетворювача 12.

10. Зняти покази об'єму води з лічильника 14 за певний час.

11. Виконати дії за пп. 9-10 при 3-4 інших ступенях відкриття вентиля 15.

Розглянемо дослідження роботи насоса без використання частотного перетворювача для систем, які працюють по рівню рідини у всмоктувальному баку. Їх планується виконувати в такій послідовності:

1. Перекрити вентиль 8 на нагнітальному трубопроводі 6.
2. Перекрити кульовий кран 17 на скидному трубопроводі 18.
3. Відкрити кульовий кран 3 на всмоктувальному трубопроводі 2.
4. Відкрити кульовий кран 11 на байпасній лінії 10.
5. Відкрити вентиль 15 після частотного перетворювача 12.
6. Увімкнути насос 4.
7. Зняти покази об'єму води з лічильника 14 за певний час.
8. Зняти покази вакуумметра 4 та манометра 13.
9. Виконати дії за пп. 7-8 при 3-4 інших ступенях відкриття вентиля 15.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Виготовлено експериментальний стенд для випробування насосів з частотним регулюванням.

Попередні результати, виконані на експериментальному стенді, підтверджують можливість проведення частотного регулювання насоса з використанням частотного перетворювача.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shankar V. K. A., Umashankar S., Paramasivam S., Hanigovszki N. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system // Applied Energy, 2016. 181. P. 495–513.
2. Gan X., Pei J., Pavesi G., Yuan S., Wang W. Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review // Energy Reports, 2022. 8. P. 11592–11606.
3. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation // Environmental modelling & software. 2017. 93. P. 209–254.

4. **Хованський С. О., Сотник М. І., Неня В. Г., Бойко В. С.** Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. 2009. Вип. 4 (57). Ч.1. С.168–171.
5. **Котиш А. І., Сіріков О. І., Кубкін М. В., Солдатенков В. П.** Розрахунок ефективності впровадження регульованого електроприводу в насосних установках // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2012. Вип. 25, ч. II. С.91–96.
6. **Marchi A., Simpson A. R., Ertugrul N.** Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems // *Drinking Water Engineering and Science*. 2012. 5 (1), 15–21.
7. **Стенд для випробування відцентрових насосів:** пат. на винахід 108036 Україна, МПК G01L 25/00. №u201600717; Заявлено 29.01.2016; Опубл. 24.06.2016, Бюл. №12. – 1 с.
8. **Лезнов Б. С.** Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. Москва : Машиностроение. 2013. 176 с.
9. **Бур'ян С. О., Землянукхіна Г. Ю., Канєвський Р. О.** Розробка лабораторного стенду для дослідження насосних установок в системах водопостачання // Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики, 2019. С. 472–479.
10. **Wilo-ElectronicControl.** Installation and operating instructions. Ed.01. – 2011-05. – 17 p.
11. **Усачев А. П., Гордейчик А. В.** Особенности частотного регулирования насосами с учетом рабочего диапазона. 11 Международный водный форум «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК-2014, конференция «Водоснабжение и водоотведение населенных мест» (4-5 июня 2014, Москва), 2014. 6 с.

REFERENCES

1. **Shankar, V. K. A., Umashankar, S., Paramasivam, S., & Hanigovszki, N. (2016).** A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 181, 495–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070>.
2. **Gan, X., Pei, J., Pavesi, G., Yuan, S., & Wang, W. (2022).** Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review. *Energy Reports*, 8, 11592–11606. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.016>.
3. **Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D. (2017).** Lost in optimisation of water

- distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental modelling & software*, 93, 209–254. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.009>.
4. **Khovanskyi, S. O., Sotnyk, M. I., Nenia, V. H., & Boiko, V. S. (2009).** Analiz chastotnoho rehuliuвання vidtsentrovyykh nasosiv vodopostachannia z metoiu enerhozberezhennia. *Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, 4 (57/1). 168–171. [in Ukrainian]. Retrieved from [http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2009-4-1\(57\)/168.PDF](http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2009-4-1(57)/168.PDF).
5. **Kotysh, A., Sirikov, O., Kubkin, M., & Soldatenko, V. (2012).** Calculation of the efficiency of implementation of regulated electric pumping plants. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 25, (II). 91–96. [in Ukrainian]. Retrieved from <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream/123456789/1497/1/18.pdf>.
6. **Marchi, A., Simpson, A. R., & Ertugrul, N. (2012).** Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. *Drinking Water Engineering and Science*, 5(1). 15–21. <https://doi.org/10.5194/dwes-5-15-2012>.
7. **Kobets, A. S., Kobets, O. M., Puhach, A. M., Davydenko, I. S., Dubovyk, O. M., & Tonkoholos, I. R. (2016).** Pat. No. 108036 UA. Stend dlia vyprobuvannia vidtsentrovyykh nasosiv. No. u201600717; declared: 29.01.2016; published: 24.06.2016, Bul. No. 12. [in Ukrainian] Retrieved from <https://uapatents.com/4-108036-stend-dlya-viprobuvannya-vidcentrovikh-nasosiv.html>.
8. **Leznov, B. S. (2013).** Chastotno-reguliruemyy jelektroprивod nasosnyh ustanovok. *Mashinostroenie*. [in Russian]. Retrieved from <https://www.proektant.org/arh/1673.html>.
9. **Burian, S. O., Zemlianukhina, H. Yu., & Kanievskyi, R. O. (2019).** Rozrobka laboratornoho stendu dlia doslidzhennia nasosnykh ustanovok v systemakh vodopostachannia. *Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky*, 472–479. [in Ukrainian]. Retrieved from <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/199187>.
10. **Wilo-Electronic Control (2011).** Installation and operating instructions. Ed.01. Retrieved from <https://www.manualslib.com/download/1658281/Wilo-Electronic-Control-Mt6.html>.
11. **Usachev, A. P., & Gordejchik, A. V. (2014).** Osobennosti chastotnoho regulirovaniya nasosami s

uchetom rabocheho diapazona. 11 International water forum «Water: Ecology and Technology» EKWATECH-2014, Conference «Water Supply and Wastewater Treatment in Towns and Communities» (June 4-5, 2014, Moskwa). [in Russian].

Retrieved from http://sibmech.ru/netcat_files/userfiles/doc/electropivod/Osobennosti_chastotnogo_regulirovaniya_nas_osami_s_uchetom_rabocheho_diapazona_Usachev_Ekvatek_2014.pdf.

Experimental test-bed for test of pumps with frequency regulation

Orest Verbovskiy, Ihor Popadyuk, Vadym Orel, Vitalii Makarchuk

Abstract. A literature review was conducted to develop an experimental stand for testing pumps. It was established that frequency regulation is one of the quantitative energy-saving methods of controlling the operation of the pumping unit. At the same time, the influence on the pump unit is carried out by changing the operating point by means of variable pump curve. The hydraulic schemes for experimental study of frequency-controlled pumps presented in the article have certain disadvantages: 1) the location of the pump relative to the tank is ambiguous regarding the operation of the pump under flooded suction; 2) pressure regulation is provided only in the direction of its decrease; 3) refers rather to the automation of pumping installations. On the designed and manufactured experimental stand, it is possible to study the operation of the pump with the use of a frequency converter and without it, through a bypass line. When testing the pump for systems that operate according to the fluid level in the suction tank, use either a valve on the discharge pipeline (with the use of a frequency converter) or a ball valve on the discharge pipeline from the discharge tank (without the use of a frequency converter). In addition, pump testing using a frequency converter can be performed for pressure-operated systems. The installed frequency converter is a regulator of the flow of the working fluid, which allows adjusting of the pump discharge. The pump designed on the experimental stand is a self-suction jet that does not need to be installed under flooded suction. The discharge tank is located higher than the suction tank, which ensures the circulation of the working fluid by gravity. The working fluid will be water. The preliminary results, performed on the experimental stand, confirm the possibility of frequency regulation of the pump using a frequency converter.

Key words: experimental test-bed, pump, frequency regulation, variable frequency, pump characteristics.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2023