

*О. І. ГАСЮК***СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ГІДРОТУРБИНИ**

Наведено аналіз існуючих у світовій і вітчизняній практиці систем управління гідротурбін. Розглянуто конструктивні особливості побудови схем з дискретним і дискретно-аналоговим способом управління. Наведено схеми управління частотою обертання гідротурбіни провідних фірм-виробників гідротурбінного обладнання: ВО «ІМЗ» і ALSTOM POWER HYDRO (Франція, Гренобль). Приведена комп'ютерна система регулювання швидкості гідравлічної турбіни гарантує безаварійну роботу в разі відхилення навантаження і збоїв в електромережі. Можливий повністю автоматичний спосіб управління гідроагрегатом, при якому комп'ютерна система управляє турбіною самостійно, на основі врахованих датчиками параметрів роботи гідроагрегату, відповідно до програми керуючої ЕОМ. Система управління постійно контролює роботу гідротурбіни, регулює її швидкість згідно з навантаженням, виконує адекватні керуючі операції. Виконано аналіз роботи схем з урахуванням специфіки функціонування системи регулювання. Розглянуто нелінійну математичну модель гідромеханічної частини регулятора для оцінки показників якості перехідних процесів, що відбуваються в процесі пуску, зупинки і реверсу гідротурбіни. Показано, що розробка теорії і методів проектування з використанням обох підходів, математичних моделей і алгоритмів управління, спрямованих на підвищення точності позиціонування і надійності гідропневмоприводів з можливим спрощенням схемних рішень, є найважливішим завданням, спрямованим на отримання значного економічного ефекту при вирішенні цієї найважливішої проблеми. Отримані результати доводять, що застосування позиційних гідропневмоприводів для побудови системи управління швидкістю гідротурбіни з дискретним і дискретно-аналоговим управлінням, дозволяє синтезувати гідропневмоприводи з високою точністю позиціонування, без застосування дорогих гідророзподільників з пропорційним управлінням.

Ключові слова: система управління, робоче колесо, поворотно-лопатева гідротурбіна, регулятор, математична модель, позиційний гідропневмопривід, синтез.

*О. HASIUK***TURBINE SPEED CONTROL**

Provides analysis of hydraulic turbine control systems existing in the world and domestic practice. The design features of constructing circuits with discrete and discrete-analog control methods are considered. The schemes for controlling the speed of the turbine of the leading manufacturers of hydraulic turbine equipment are given: PO "LMZ" and ALSTOM POWER HYDRO (France, Grenoble). The given computer system of hydraulic turbine speed control guarantees trouble-free operation in case of load deviation and power failures. A fully automatic method of controlling the hydraulic unit is possible, in which the computer system controls the turbine independently, based on the parameters of the hydraulic unit operation taken into account by the sensors, in accordance with the program of the control computer. The control system constantly monitors the operation of the hydraulic turbine, adjusts its speed according to the load, performs adequate control operations. The analysis of the operation of the circuits is carried out, taking into account the specifics of the functioning of the regulation system. A mathematical model of the hydromechanical part of the regulator is considered for assessing the quality indicators of transient processes occurring in the process of starting, stopping and reversing a hydraulic turbine. It is shown that the development of theory and design methods using both approaches, mathematical models and control algorithms aimed at increasing the positioning accuracy and reliability of hydropneumatic systems with a possible simplification of circuit solutions is an important task aimed at obtaining a significant economic effect when solving this most important problem. The results obtained prove that the use of a positional hydraulic-pneumatic drive for building a hydraulic turbine speed control system with discrete and discrete-analog control makes it possible to synthesize a hydraulic pneumatic drive with high positioning accuracy, without the use of expensive hydraulic valves with proportional control.

Keywords: control system, impeller, rotary blade hydraulic turbine, regulator, mathematical model, positional hydraulic pneumatic drive, synthesis.

Вступ. Система управління частотою обертання ротора гідротурбіни (СУЧОР) призначена для виконання наступних основних функцій: пуск гідроагрегату (гідротурбіни і електрогенератора), при якому механізми приходять в дію в потрібній послідовності (розворот робочого колеса, агрегат розгортається, синхронізується і підключається до мережі); робота на енергосистему великої потужності; робота на ізольоване (виділене) навантаження; стійка робота на холостому ходу; робота при скидах навантаження з відключенням генератора від енергосистеми та ін. Значуще місце в СУЧОР займають гідравлічні приводи (ГП), що представляють собою сукупність гідравлічних пристроїв, що забезпечують узгоджене виконання функцій з регулювання направляючого апарату (НА) і робочого колеса (РК) в поворотно-лопатевої турбіни [1–15].

Сучасний стан розвитку СУЧОР. Подальший розвиток обчислювальної техніки, засобів автоматки, елементної бази гідрообладнання і теорії автоматичного управління дозволили перейти до розробки і створення більш досконалих систем регулювання гідротурбінами і її складових ГП_{НА} і

ГП_{РК} [1, 7].

На рис. 1 зображена функціональна система комп'ютерної СУЧОР гідротурбіни, розроблена фірмою ALSTOM POWER HYDRO (Франція, Гренобль) [1]. Подібні системи розроблені фірмами Woodward (США), VaTech (Австрія), Voith Siemens (Германія).

Більшість гідравлічних турбін ГЕС експлуатується з гідромеханічними і електрогідравлічними регуляторами швидкості типу РК і ЕРК, які розроблялися і виготовлялися у 1950–1960 роках.

Ці регулятори надійні в роботі і обслуговуванні, але на сьогоднішній день вони поступають сучасним цифровим електронним регуляторам за такими параметрами, як швидкодія реакції регулятора на зміну зовнішнього навантаження, частоти мережі, здатність діагностувати стан ланок регулювання і здійснювати пошук несправностей, приймати рішення щодо економічного витрачання гідроресурсів.

Для вирішення завдання модернізації існуючої системи регулювання частоти обертання гідравлічних турбін на ГЕС консорціум «Регулятор» (Україна,

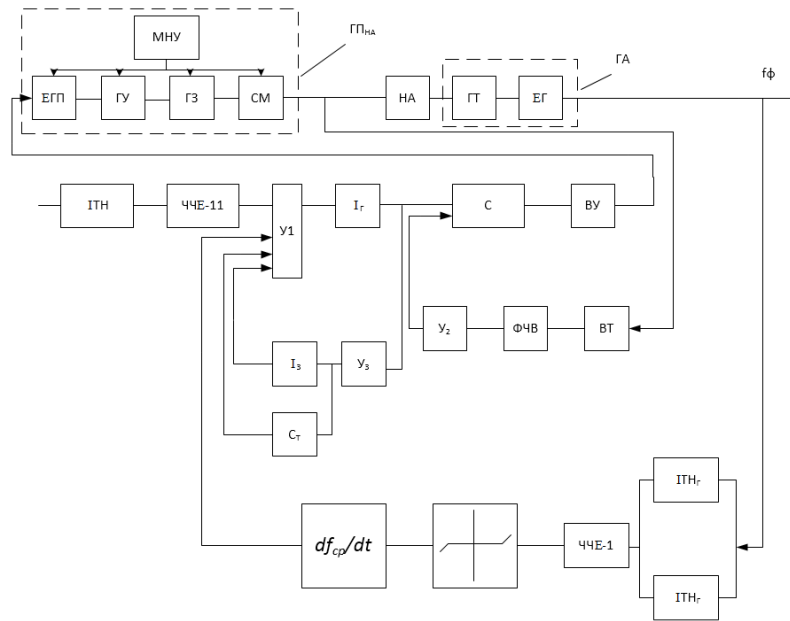


Рис. 2. Функціональна схема електрогідравлічної СУЧОР нової модифікації:

МНУ – маслонапірна установка; ІГ – головний інтегратор; ІПН, ІПН_г – вимірювальні трансформатори струму і напруги; ЧЧЕ-1, ЧЧЕ-11 – частотно-чутливі елементи; У1, У2, У3 – підсилювачі; ВУ – вихідний підсилювач; ЕГП – електрогідравлічний перетворювач; Із – ізодрум; Ст – пристрій зміни статизму; ЕГ – електрогенератор; ВТ – обертовий трансформатор; ГТ – гідротурбіна; С – суматор; НА – направляючий апарат; ГП_{ПК} – гідропривід повороту лопатей робочого колеса; ГП_{НА} – гідропривід повороту лопаток направляючого апарату; ГА – гідроагрегат

Цей вхідний сигнал порівнюється з фактичною частотою на вихідний ланцюг електрогенератора f_{ϕ} (для цього використовуються вимірювальні трансформатори напруги і струму). Сигнал неузгодженості надходить на підсилювач $У_1$, інтегратор $ІГ$, які охоплені зворотним зв'язком сигналом від електричного ізодруму $Із$. На виході $ІГ$ формується сигнал завдання на зміну положення лопаток $НА$. На суматорі $С$ цей сигнал завдання порівнюється з сигналом фактичного положення штоку $СМ$ направляючого апарату.

Сигнал неузгодженості надходить на ЕГП, що викликає переміщення золотника $ГЗ$, отже, і $СМ$ до тих пір, поки не буде відпрацьовано відхилення частоти, що з'явилося.

Особливостями модифікації є: інший спосіб вимірювання фактичної частоти обертання $ГА$, інші пристрої перетворення сигналу на $ГП$ і зменшення числа елементів, що входять до складу $ГП$.

Нормальне функціонування системи в значній мірі визначається динамікою її гідромеханічної частини. Наприклад, для повороту лопаток направляючого апарату $НА$ вона включає маслонапірну установку $МНУ$, головний гідророзподільник $ГР$, два сервомотора і направляючий апарат $НА$ з відповідними вимірювальними перетворювачами їх положення [5, 6, 8].

Математична модель цієї частини містить:

- рівняння площі щілини $ГР$ [14]

$$A_{щ} = 2R^2(\alpha - \sin \alpha), \quad (1)$$

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{X}{R}\right);$$

- рівняння витрат через напірну і зливну порожнини $ГР$

$$Q_{нп} = \mu A_{щ} \sqrt{\frac{2|P_{МНУ} - P_1|}{\rho \left[1 + \left(\frac{A_{щ}}{A_K}\right)^2\right]}} \text{sign}(P_{МНУ} - P_1), \quad (2)$$

$$Q_{сл} = \mu A_{щ} \sqrt{\frac{2|P_2 - P_{сл}|}{\rho \left[1 + \left(\frac{A_{щ}}{A_K}\right)^2\right]}} \text{sign}(P_2 - P_{сл}); \quad (3)$$

- рівняння тисків в напірній і зливній порожнинах узагальненого (еквівалентного двом) сервомотора $СМ$

$$\dot{p}_1 = \frac{(Q_{нп} - A_{п1}\dot{x}_z)E}{V_{оН} + A_{п1}X_z}, \quad \dot{p}_2 = \frac{(A_{п2}\dot{x}_z - Q_{сл})E}{V_{оС} - A_{п2}X_z}; \quad (4)$$

- рівняння руху штока сервомотора, що здійснює поворот лопаток $НА$

$$m\ddot{x}_z = A_{п}(P_1 - P_2) - F_{тр} - \beta\dot{x}_z - F_C; \quad (5)$$

- вираз, що визначає переміщення золотника $ГР$, викликане керуючим впливом від ЕОМ при зміні навантаження на гідротурбіну

$$x = x(t). \quad (6)$$

Тут R – радіус золотника $ГР$; μ , ρ – відповідно коефіцієнт витрати і щільності робочої рідини ($РР$); $P_{МНУ}$ – тиск $РР$ в $МНУ$; A_K – площа перерізу підвідних і відвідних каналів $ГР$; E – об'ємний модуль пружності

PP; V_{OH} , V_{OC} – первинний об'єм відповідно в напірній і зливній порожнинах сервомотора; F_{TP} – сила тертя поршня і штока сервомотора об стінки; m – сумарна маса рухомих частин, приведена до осі сервомотора; β – коефіцієнт в'язкого тертя; A_{II} – ефективна площа поршня сервомотора; x_Z – переміщення штока CM [15–21].

При дослідженні математичної моделі (1)–(6) і лінійному законі зміни $x(t)$ в середовищі пакету імітаційного моделювання були отримані перехідні процеси переміщення $x_Z(t)$ при повороті лопаток НА на збільшення витрат. Дослідження лягли в основу вибору співвідношень відкриття крайок ГР і швидкості переміщення лопаток направляючого апарату для забезпечення директивного часу при пуску і зупинці гідравлічної турбіни. Графіки перехідних процесів, зняті при налагодженні регулятора на турбіні ПЛ20-80Ж Кременчуцької ГЕС, показали, що цифровий регулятор істотно покращує характеристики турбіни при широкій зміні зовнішніх факторів, що обурюють, і може бути основою для подальшого вдосконалення процесів регулювання турбін.

Висновки. 1. Аналіз СУЧОР за останні роки показує чітку тенденцію впровадження в систему сучасних засобів приладобудування та електронної техніки, включаючи ЕОМ. Це забезпечує: з одного боку істотне зменшення допоміжних механічних елементів (тяг, важелів, ланцюгів), гідравлічних ізодромів; з іншого – встановлення сучасних вимірювальних перетворювачів (датчиків) частоти обертання і переміщення золотників гідророзподільників і штоків сервомоторів.

2. Подальший розвиток обчислювальної техніки, засобів автоматики, елементної бази гідропневмообладнання і теорії автоматичного управління і синтезу позиційних гідропневмоагрегатів дозволив перейти до розробки і створення більш досконалих систем регулювання гідротурбін і їх складових – гідроприводу повороту лопаток направляючого апарату і гідроприводу повороту лопатей робочого колеса, що працюють згідно комбінаторної залежності для забезпечення високого ККД і стійкої роботи гідротурбіни.

Список літератури

1. Русанов А. В., Гнесін В. І. *Науково-технічні основи моделювання і проектування проточних частин енергетичних турбоустановок*. Харків: Іпмаш, 2019. 386 с.
2. Сокол Є., Черкашенко М., Потетенко О., Дранковський В., Гасюк О., Гриб О. *Гідроенергетика. Том 2. Гідравлічні машини*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 534 с.
3. Мигущенко Р. П., Черкашенко М. В., Потетенко О. В., Гасюк А. І., Дорошенко А. В., Черкашенко А. Системи управління гідротурбін. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No. 1. P. 84–97.
4. Черкашенко М. В., Вурье Б. А., Гасюк А. І., Потетенко О. В. *Синтез комбинационных схем гидроневоавтоматики*. Germany: GMBH, 2020. 130 с.
5. Умов В. А., Филатов И. Н. *Динамические характеристики гидравлических агрегатов*. ЛПИ, 1983. 72 с.
6. Умов В. А., Филатов И. Н. *Определение параметров и динамических характеристик систем автоматического*

регулирования гидроагрегатов. СПбГТУ, 1995. 84 с.

7. *Руководство по эксплуатации регулятора скорости ALSTOM радиально-осевой гидротурбины*. Гренобль, 2011. 206 с.
8. Афанасьев А. М., Байков Г. М., Гавшин В. А. Система автоматического управления гидротурбин на программируемых контроллерах. *Научно-технические проблемы современного гидромашиностроения и методы их решения. Труды международной научно-технической конференции (5–7 июня 2001 г., СПб)*. 2001. С. 87–91.
9. Балагуров Е. В., Башнин О. И., Гельфанд Г. П. Разработка и внедрение систем управления гидроагрегатами ГЭС. *Научно-технические проблемы современного гидромашиностроения и методы их решения. Труды международной научно-технической конференции (5–7 июня 2001 г., СПб)*. 2001. С. 91–95.
10. Горбешко М. В., Шавлович З. А. Совершенствование объемного гидропривода механизма регулирования гидротурбин. *Конструкции и рабочий процесс гидротурбин. Труды СПБИМаиш*. 1997. Вып. 6. С. 95–96.
11. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes of drives system*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. 120 p.
12. Черкашенко М. В., Сериков А. Д., Салыга Т. С., Фатеев А. Н., Фатеева Н. Н., Радченко Л. Р. *Позиционные гидроневоагрегаты*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. 115 с.
13. Черкашенко М. В. *Синтез минимальных схем гидроневоагрегатов* / ред. Вурье Б. А. Пневмогидромашини, 2013. 265 с.
14. Лурье З. Я., Гасюк А. И., Булгаков В. А., Цехмистро Л. Н., Цента Е. Н. Синтез мехатронного гидропривода рабочего колеса гидротурбины. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 45. P. 47–52.
15. Adegbuyi P. Hydraulic and pneumatic cylinder failures, the effect of fluid cleanliness on component life. *Hidraulica*. 2013. No. 1. P. 27–30.
16. Chengwen C. Research on PLC-Based Pneumatic Controlling System of Flying Splicer of Web-Fed Offset Presses. *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2011. No. 5. P. 160–165.
17. Струтинський В. Б., Гуржій А. М., Кривошов В. С. *Математичне моделювання процесів і систем*. Харків: НАУ, 2011. 672 с.
18. Русанов А. В., Пашенко Н. В., Косьянова А. И. Метод аналитического профилирования лопаточных венцов проточных частей осевых турбин. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2009. № 2/7 (38). С. 32–37.
19. Jacob P. A., Ventura C., Rowland A. S. Preliminary design and performance estimation of radial inflow turbines an automated approach. *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*. 2012. No. 134. P. 1–13.
20. Rusanov A. Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Central European Journal of engineering*. 2015. Vol. 5. P. 399–410.
21. Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Шапов П. Ф. *Теоретичні та практичні засади систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. 260 с.

References (transliterated)

1. Rusanov A. V., Hnyesin V. I. *Naukovo-tehnikhni osnovy modelyuvannya i proektuvannya protochnykh chastyn energichnykh turboustanovok* [Scientific and technical bases of modeling and designing of flowing parts of power turbo installations]. Kharkiv, Ipmash Publ., 2019. 386 p.
2. Sokol Ye., Cherkashenko M., Potetenko O., Drankovsk'kyu V., Hasyuk O., Hryb O. *Hidroenerhetyka. Tom 2. Hidravlichni mashyny* [Hydropower engineering. Vol. 2. Hydraulic machines]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020. 534 p.
3. Migushchenko R. P., Cherkashenko M. V., Potetenko O. V., Gasyuk A. I., Doroshenko A. V., Cherkashenko A. *Sistemy upravleniya gidroturbin* [Hydraulic turbin control systems]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 1, pp. 84–97.
4. Cherkashenko M. V., Vur'e B. A., Gasyuk A. I., Potetenko O. V. *Sintez kombinatsionnykh skhem gidropnevmoavtomatiki* [Synthesis of combinatorial schemes of hydropneumoautomatics]. Germany,

- GMBH Publ., 2020. 130 p.
5. Umov V. A., Filatov I. N. *Dinamicheskie kharakteristiki gidravlicheskih agregatov* [Dynamic characteristics of hydraulic units]. LPI Publ., 1983. 72 p.
 6. Umov V. A., Filatov I. N. *Opreделение parametrov i dinamicheskikh kharakteristik sistem avtomaticheskogo regulirovaniya gidroagregatov* [Determination of parameters and dynamic characteristics of automatic control systems of hydraulic units]. SPbGTU Publ., 1995. 84 p.
 7. *Rukovodstvo po ekspluatatsii regulatora skorosti ALSTOM radial'no-osevoy gidroturbiny* [ALSTOM radial-axis hydraulic turbine speed regulator manual]. Grenoble, 2011. 206 p.
 8. Afanas'ev A. M., Baykov G. M., Gavshin V. A. Sistema avtomaticheskogo upravleniya gidroturbin na programmiruemyykh kontrollerakh [Automatic control system for hydraulic turbines on programmable controllers]. *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovremennogo gidromashinostroeniya i metody ikh resheniya. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (5–7 iyunya 2001 g., SPb)* [Scientific and Technical Problems of Modern Hydromechanical Engineering and Methods of their Solutions. Proc. of the Int. Sci. and Techn. Conf. (5–7 June 2001, St. P)]. 2001, pp. 87–91.
 9. Balagurov E. V., Bashnin O. I., Gel'fand G. P. Razrabotka i vnedrenie sistem upravleniya gidroagregatami GES [Development and implementation of hydropower unit control systems]. *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovremennogo gidromashinostroeniya i metody ikh resheniya. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (5–7 iyunya 2001 g., SPb)* [Scientific and Technical Problems of Modern Hydromechanical Engineering and Methods of their Solutions. Proc. of the Int. Sci. and Techn. Conf. (5–7 June 2001, St. P)]. 2001, pp. 91–95.
 10. Gorbeshko M. V., Shavlovich Z. A. Sovershenstvovanie ob"emnoy gidroprivoda mekhanizma regulirovaniya gidroturbin [Improvement of volumetric hydraulic drive of hydraulic turbine control mechanism]. *Konstruktsii i rabochiy protsess gidroturbin. Trudy SPbIMash.* 1997, issue 6, pp. 95–96.
 11. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Syntesis of control schemes of drives system*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018. 120 p.
 12. Cherkashenko M. V., Serikov A. D., Salyga T. S., Fateev A. N., Fateeva N. N., Radchenko L. R. *Pozitsionnye gidropnevoagregaty* [Positional hydropneumatic units]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015. 115 p.
 13. Cherkashenko M. V. *Sintez minimal'nykh skhem gidropnevoagregatov* [Synthesis of minimum schemes of hydropneumatic units]. *Pnevmogidromashiny* Publ., 2013. 265 p.
 14. Lur'e Z. Ya., Gasyuk A. I., Bulgakov V. A., Tsekhmistro L. N., Tsenta E. N. Sintez mekhatronnogo gidroprivoda rabocheho koleasa gidroturbiny [Synthesis of a mechatronic hydraulic drive of a hydraulic turbine impeller]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 45, pp. 47–52.
 15. Adegbuyi P. Hydraulic and pneumatic cylinder failures, the effect of fluid cleanliness on component life. *Hidraulica*. 2013, no. 1, pp. 27–30.
 16. Chengwen C. Research on PLC-Based Pneumatic Controlling System of Flying Splicer of Web-Fed Offset Presses. *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2011, no. 5, pp. 160–165.
 17. Strutyn'skyy V. B., Hurzhiy A. M., Kryvtsov V. S. *Matematychni modelyuvannya protsesiv i sistem* [Mathematical modeling of processes and systems]. Kharkiv, NAU Publ., 2011. 672 p.
 18. Rusanov A. V., Pashchenko N. V., Kos'yanova A. I. Metod analiticheskogo profilirovaniya lopatochnykh ventsov protochnykh chastei osevykh turbin [Method of analytical profiling of blading crowns of axial turbine flow parts]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 2009, no. 2/7 (38), pp. 32–37.
 19. Jacob P. A., Ventura C., Rowland A. S. Preliminary design and performance estimation of radial inflow turbines an automated approach. *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*. 2012, no. 134, pp. 1–13.
 20. Rusanov A. Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Central European Journal of engineering*. 2015, vol. 5, pp. 399–410.
 21. Myhushchenko R. P., Kropachek O. Yu., Shchapov P. F. *Teoretychni ta praktychni zasady sistem kontrolyu ta diahnostuvannya skladnykh promyslovykh ob"yektiv* [Theoretical and practical principles of systems of control and diagnosis of complex industrial objects]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015. 260 p.

Надійшло (received) 10.10.2022

Відомості про автора / About the Author

Гасюк Олександр Іванович (Hasiuk Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-8501>; e-mail: galexom@gmail.com