

С.Л. Карпенко, Г.В. Рудакова

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАКРИТОЇ ЗРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Анотація. У статті розглянуто схему взаємозв'язків між основними компонентами закритої зрошувальної системи такими як насосний агрегат, розподільний та зрошувальний трубопровід, запірна арматура, дощувальні машини універсальні, система керування з їх подальшим математичним описом. Проаналізовано систему як об'єкт керування, виявлені вхідні, вихідні та внутрішні параметри системи.

Ключові слова: насосний агрегат, запірна арматура, закрыта зрошувальна система, зрошувальне обладнання, математична модель.

Постановка проблеми. Перетворення сільськогосподарського виробництва у високо розвинутий сектор економіки неможливе без послаблення його залежності від несприятливих природно-кліматичних умов. Україна належить до тих країн, де меліорація є одним з визначальних факторів загального стану виробництва продуктів харчування, сировини для промисловості, забезпечення продовольчої безпеки держави та експорту продукції сільськогосподарської галузі [1].

Важливим аспектом підтримання технологічного процесу вирощування агрокультур особливо на півдні країни є автоматизовані системи поливу, для ефективної роботи яких необхідно налаштування з урахуванням певних факторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В закритих зрошувальних системах (ЗЗС) на півдні України переважно застосовують дощувальні машини серії «Фрегат» (64% від загальної кількості роботоспроможних зрошувальних установок [2]). Загальну схему ЗЗС наведено на рис.1.

При експлуатації таких систем виникає низка проблем:

1. Серійна механізована зрошувальна система серії «Фрегат» обладнується та передбачає лише механічні методи управління, що виключає дистанційне керування або керування з використанням автоматизованих систем [3].

Одним з шляхів впровадження методів дистанційного керування в таких системах є використання сучасних технічних засобів автоматизації, а саме заслінок з електромеханічним приводом для вмикання або вимикання окремих фрегатів.

2. Існує проблема контролю тиску у ЗЗС. Виникнення суттєвих коливань тиску у системі може стати причиною виведення з ладу дощувальних машин; різке збільшення тиску у розподільному трубопроводі може спричинити його деформацію і, як наслідок, прорив. Різка зміна тиску у гідросистемі також спричиняє підвищення навантаження на насосні агрегати та може стати причиною їх поломки [4].

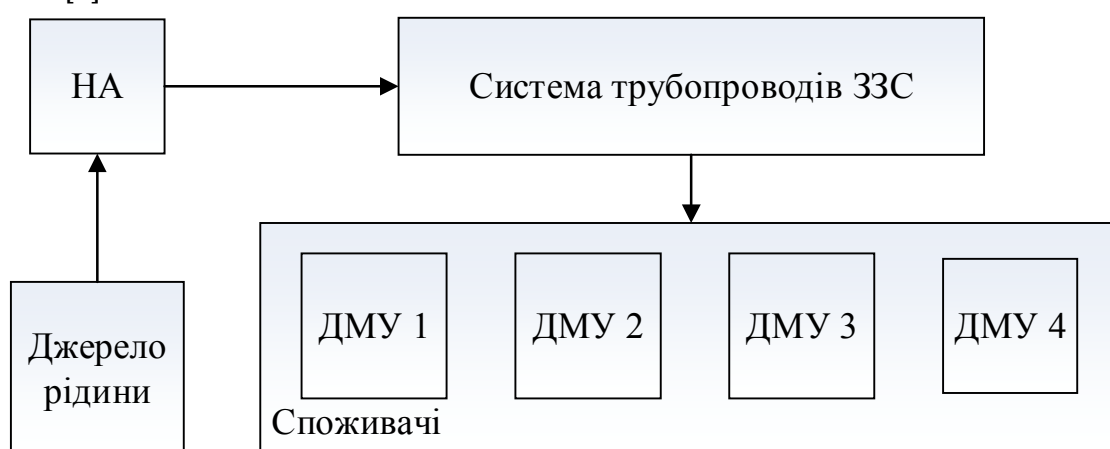


Рисунок 1 – Загальна схема ЗЗС

Можливим вирішенням цих задач є керування тиску у магістралі водопостачання дощувальних машин, шляхом автоматичного керування насосним обладнанням та встановленням відповідних датчиків (тиску, витратомірів та ін.) для зворотного зв'язку з системою керування.

За рахунок керування насосним обладнанням, яке створює тиск у магістралі, можна забезпечити належні режими роботи у магістралі водопостачання ДМУ.

Для покращення режимів поливу та дистанційного контролю стану системи необхідне також наявність відповідного програмного забезпечення для збору статистичних даних та керування.

Проведений аналіз схеми розташування дощувального обладнання [5] виявив доцільність переходу до типової узагальненої схеми (рис.2), що дозволяє уніфікувати обчислення для всіх можливих варіантів підключення в процес поливу (тобто активного дощувального обладнання) дощувальних машин універсальних ДМУ.

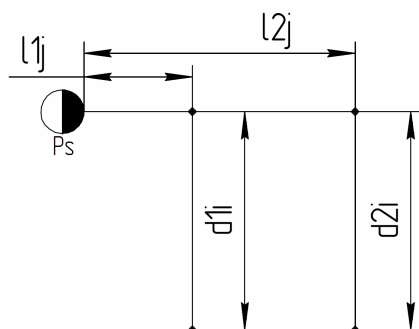


Рисунок 2 – Узагальнена умовна схема ЗЗС

Для ефективної роботи такої системи необхідно своєчасне перемикання між режимами роботи насосного агрегату, що можливо при існуванні належної системи керування. При розробці методів керування та виборі технічних засобів насамперед постає задача аналізу ЗЗС як об'єкта керування.

Мета дослідження. Метою дослідження є побудова математичної моделі ЗЗС як об'єкту керування, яка дозволить здійснювати аналіз процесів, що протікають в системі, та оцінювати ефективність методів керування, що розробляються.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для побудови математичної моделі ЗЗС як об'єкту керування розглянемо взаємозв'язки між окремими компонентами системи. Схему взаємодії складових компонентів наведено на рис. 3.

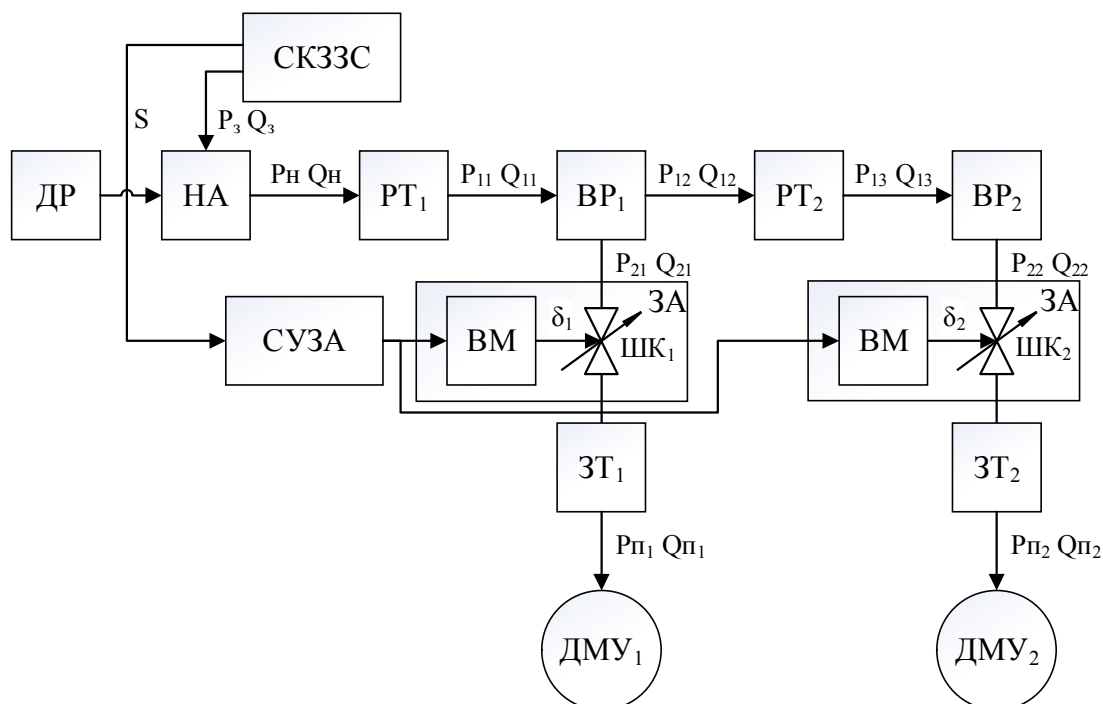


Рисунок 3 – Схема взаємозв'язків між складовими компонентами ЗЗС

До складу ЗЗС входять наступні компоненти:

1) насосний агрегат (НА), що забезпечує подачу води до системи трубопроводів з джерела рідини (ДР), яким може виступати відкрита водойма або магістральний трубопровід;

2) розподільний та зрошувальний трубопроводи (РТ та ЗТ), які поєднані в єдину систему за допомогою вузлів водорозподілу (ВР);

3) запірна арматура (ЗА) для підключення/відключення дощувального обладнання та регулювання потоку рідини за допомогою виконавчого механізму (ВМ) та шарового крану (ШК);

4) дощувальні машини універсальні (ДМУ), які безпосередньо забезпечують зрошення та є основними споживачами;

5) система керування закритою зрошувальною системою (СКЗЗС) та система управління запірною арматурою (СУЗА).

Основними параметрами в системі, які змінюються під час роботи, є тиск P , витрати Q та швидкість руху рідини V на виході відповідних компонентів схеми. Існують певні обмеження на припустимі значення для цих параметрів системи. Регулювання технологічних параметрів можливо здійснювати за рахунок зміни ступеня відкриття засувки ЗА (δ_1 , δ_2) та корегування відповідним чином частоти обертання ω електродвигуна насосного агрегату НА для підтримання необхідного тиску в усіх ланках трубопроводу ЗЗС.

Оскільки ЗЗС має у своєму складі систему трубопроводів великої довжини та діаметру, система має суттєву інерційність. ДМУ, які входять у склад ЗЗС, потребують подачі рідини постійного об'єму та тиску. Регулювання запірною арматурою в штатному режимі повинно здійснюватися плавно (для запобігання гідро ударів), тому при побудові системи автоматизованого керування запірної арматури (регулювання витрат та тиску рідини), необхідно формулювати задачу керування для ЗА з наступними показниками якості:

- перерегулювання відсутнє;
- час повного відкриття/закриття ЗА повинно складати $t_{за} = 60$ с;

При моделюванні ЗЗС приймаються наступні припущення:

- в усіх трубах протікає однофазний потік рідини, температура якого однакова на всіх ділянках;
- усі труби розташовані на одному рівні;
- втрати рідини при проходженні трубопроводу відсутні;
- у системі немає зворотних потоків.

Розглянемо компоненти системи (див. рис. 3.) окремо:

1. Математичний опис насосного агрегату.

До насосного агрегату у ЗЗС висуються жорсткі вимоги що до тиску та розходу рідини на виході НА. Структурна схема НА (рис. 4) у своєму складі має: насос (Н), двигун (Д) та систему автоматичного регулювання частоти (САРЧ). Для контролю параметрів НА необхідно застосовувати систему автоматичного регулювання напором (САРН).

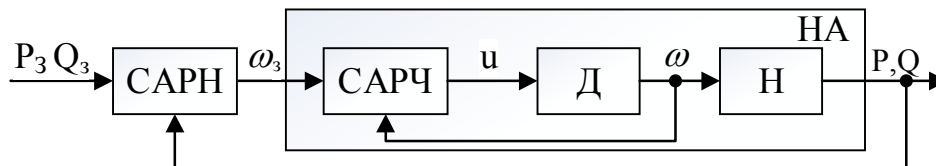


Рисунок 4 – Структурна схема регулювання частоти обертів

1). Насоси – це гідравлічні машини, які перетворюють механічну енергію двигуна в енергію рідини, що переміщується, за рахунок підвищення її тиску.

До основних характеристик насосів відносяться: продуктивність Q , та напір H які суттєво залежить від частоти обертів валу двигуна ω , їх можна розрахувати за наступними формулами [6]:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad (1)$$

$$H = F_n \left(\frac{Q}{Q_n} \right) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (2)$$

де $g=9.81$, $[м/с^2]$ - прискорення вільного падіння; ρ - середня щільність води у насосі, $[кг/м^3]$; Q, Q_n - продуктивність насосу фактична та номінальна, $[м^3/ч]$; ω, ω_n - число обертів ротору насосу фактичне та номінальне, $[об/м]$; H - напір насосу, $[м. вод. ст.]$, $F_n(Q/Q_n)$ - описує номінальну робочу напірну характеристику насосу [7].

Для опису насосу зазвичай використовують напірно-витратну характеристику яку можна визначити за паспортними даними для окремого насосу.

2). Двигун, що обертає насос, зазвичай при моделюванні задають як інерційну ланку першого порядку, якій відповідає рівняння:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_M u, \quad (3)$$

де T_M - постійна часу виконавчого механізму; k_M - коефіцієнт посилення.

3). Система автоматичного регулювання частоти може здійснювати управління за допомогою ПІД-закону, якому відповідає рівняння:

$$u = K_p \omega + K_I \int \omega dt + K_D \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

де u - сигнал керування, що формується регулятором; K_p , K_I та K_D - коефіцієнти налаштування регулятора.

2. Математичний опис системи трубопроводів.

Трубопроводи у ЗЗС використовуються різних діаметрів D та довжин L . Їх можна представити за допомогою узагальненої схеми, як наведено на рис. 5.

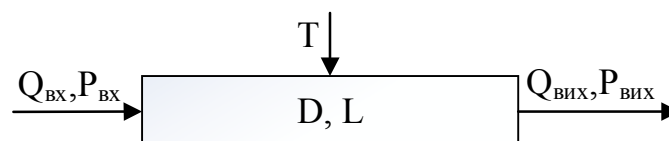


Рисунок 5 – Схематичне зображення трубопроводу

З урахуванням зробленого припущення, що втрати рідини при проходженні через трубопровід відсутні, можемо визначити, що витрати не змінюються по всій довжині трубопроводу, $Q_{вх} = Q_{вих}$.

Втрати тиску $\Delta P = P_{вх} - P_{вих}$ в трубопроводі на тертя потоку води о стінки трубопроводу визначаються діаметром трубопроводу, матеріалом з якого він виготовлений, і швидкістю води через трубопровід, та визначається як:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho [\text{Па}], \quad (5)$$

де L – довжина трубопроводу, м; V – середня швидкість, м/с; D – діаметр трубопроводу, м; ρ – густина рідини, кг/м³; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, який визначається наступним чином:

$$\lambda = \frac{1}{(1.81 \lg \text{Re} - 1.5)^2}, \quad \text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (6)$$

де V – швидкість руху рідини, м/с; D – внутрішній діаметр труби, м; ν – кінематична в'язкість води, м²/с, яка має суттєву залежність від температури рідини [8].

При зміні температури рідини у рамках від 5 до 25 °C значення кінематичної в'язкості можуть змінюватись понад 40%, що обумовлено зміною питомих втрат тиску та коефіцієнту гідравлічного тертя майже на 10%.

3. Модель запірної арматури.

Запірна арматура, що може функціонувати автоматично, має у своєму складі заслінку (шаровий кран), двигун, частотно-керуючий перетворювач та редуктор, схематичне зображення приведено на рис. 6.

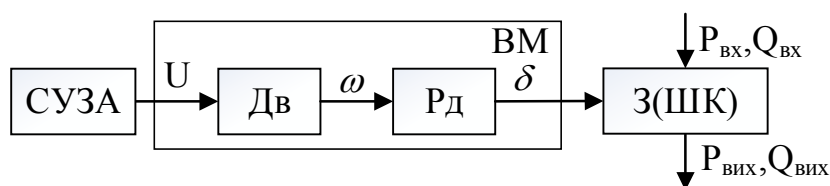


Рисунок 6 – Схематичне зображення запірної арматури

1). Двигун приводу запірної арматури сумісно з частотно-керуючим перетворювачем будемо вважати безінерційною ланкою, оскільки динамічні процеси розгону та гальмування двигуна значно швидші, ніж відкриття/закриття запірної арматури [9], тобто $\omega = K_{\partial} U_{за}$.

Передаточна функція двигуна:

$$W_{\partial}(s) = \frac{\omega_{\partial}(s)}{U_{за}(s)} = K_{\partial}, \left[\frac{1}{Bc} \right] \quad (7)$$

де ω_{∂} – частота обертання валу двигуна, K_{∂} – коефіцієнт передачі ланки «перетворювач-двигун», $U_{за}$ – напруга задана на вході перетворювача частоти.

2). Кут повороту валу редуктора, а також засувки описуються інтегральним рівнянням [10]:

$$\delta_{за}(t) = K_{за} \int_0^{t_0} \omega_{\partial}(t) dt. \quad (8)$$

Тоді передаточна функція валу редуктора та шарового крану має вид:

$$W_{за}(s) = \frac{\delta_{за}(s)}{\omega_{\partial}(s)} = \frac{K_{за}}{s}. \quad (9)$$

Залежність між витратами води та кутом повороту запірної арматури має вигляд:

$$Q(t) = Q_{\max} f\left(\frac{\delta_3}{\delta_{3\max}}\right). \quad (10)$$

Або для лінійного випадку:

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot \delta_3 / \delta_{3\max}. \quad (11)$$

Типові графіки залежності витрати від кута повороту $\varphi = f(\delta)$, наведено на рис. 7, де $\varphi = Q/Q_{\max}$ – відносний коефіцієнт витрат; $\delta = \delta_z/\delta_{z\max}$ – відносний коефіцієнт відкриття засуву: [11].

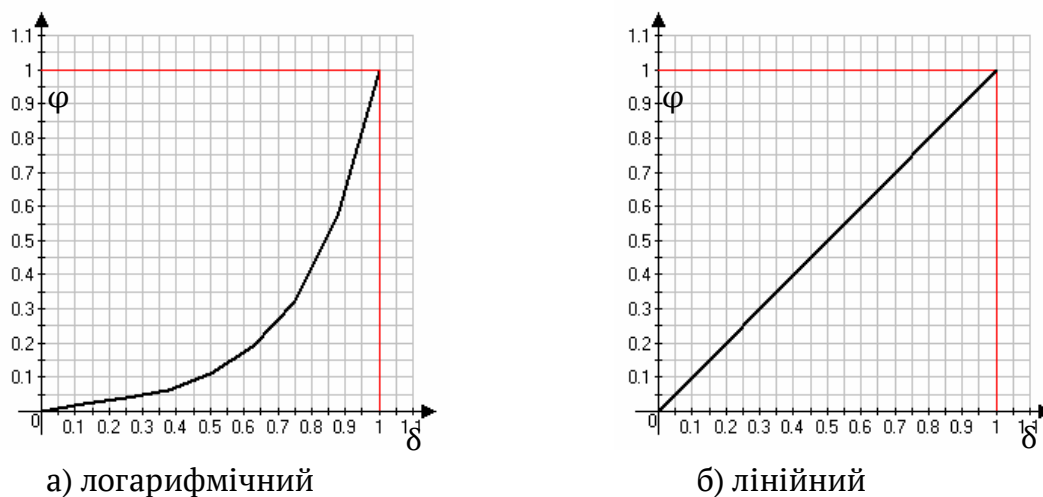


Рисунок 7 – Графік залежності витрати від кута повороту

Проаналізувавши складові моделі ЗЗС як об'єкту управління, можна виділити вхідні, вихідні та внутрішні параметри системи.

Вхідними параметрами, які діють на систему є:

- 1) схема розташування активного зрошувального обладнання S , яка задається оператором згідно плану поливів;
- 2) сигнал завдання витрат рідини Q_z необхідних для зрошення агрокультур, який задається оператором згідно плану поливів;
- 3) сигнал завдання тиску P_z необхідного для коректної роботи зрошувального обладнання, який задається оператором згідно технічних характеристик зрошувального обладнання;
- 4) сигнал з датчиків температури T , розташованих у водоймі з якої йде забір води для поливу, перейдеться автоматично.

До вихідних параметрів системи відносяться:

- 1) тиск на різних ділянках трубопроводу,
- 2) напір P_{Π} та витрати Q_{Π} рідини, що подаються на ДМУ.

До внутрішніх параметрів системи відносяться:

- 1) частота обертів валу двигуна/насосу насосної станції;
- 2) кут відкриття засувки на вході в зрошувальний трубопровід;
- 3) кількість активного зрошувального обладнання.

Ефективне керування технологічним обладнанням повинне забезпечити рівномірність та виконання норм поливу згідно плану зволоження ґрунту.

Висновки. Математична модель ЗЗС побудована з розглянутих моделей компонентів, надає можливість аналізувати процеси, що протікають в системі, та оцінювати ефективність методів керування, що розробляються.

Для визначення адекватності математичної моделі, яка створюється за запропонованим підходом, доцільно здійснити імітаційне моделювання роботи ЗЗС для реальних умов в різних режимах роботи.

Для визначення властивостей ЗЗС як об'єкта керування, таких як інерційність, керованість, стійкість, спостережливість, необхідно отримати модель комплексу у просторі станів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Загальнодержавна цільова програма розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року. Указ Президента України від 24.05.2012 р. № 4836.
2. Гурин В.А., Степаненко М.Г., Степаненко М.П. Технологія зрошування: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. – 382 с.
3. Полетаев Ю.Б., Криулин К.Н., Патрина М.Ю. Орошение дождеванием: учебное пособие – СПб: гос. Политехн. ун-т, 2003. – 53 с.
4. Гурин В.А., Степаненко М.Г., Степаненко М.П. Технологія зрошування: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. – 382 с.
5. Карпенко С.Л., Лебеденко Ю.О., Рудакова Г.В., Рудакова А.А., Моделювання схеми розташування активного дощувального обладнання закритої зрошувальної системи. Системні технології. 2021. Вип. 2(133). С. 89–96.
6. Ледуховский Г. В., Поспелов А. А. О расчете рабочих характеристик центробежных насосов с частотным регулированием производительности. Новости Теплоснабжения. 2013. Вип. 10(158). С. 38-41.
7. Колесников А. И., Федоров М.Н., Варфоломеев Ю.М. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: учебное пособие – М.: ИНФРА-М, 2005. – 124 с.
8. Карпенко С.Л., Рудакова Г.В., Поліщук В.М. Моделювання впливу зовнішніх факторів на гідравлічні характеристики закритої зрошувальної системи. Прикладні питання математичного моделювання. 2021. Т.4, №2.1, С. 119-127.
9. Шаров В.С. Сверхвысокоточные асинхронные электродвигатели. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 288 с.

10. Чумаков Г.А., Луняка К.В., Кривенко С.В. Курс лекцій з дисципліни “Гідравліка і гідро-, пневмопривод”: навчальний посібник –Херсон:ХНТУ, 2009.– 121 с.
11. РД РТМ 26-07-254-83 Гидравлические характеристики и методика расчета гидродинамических компонентов шаровых регулирующих и запорных кранов. [Действительный от 01.07.1984]. Москва, 1984. 18 с. (Информация и документация).

REFERENCES

1. National target program for the development of water management and environmental rehabilitation of the Dnieper River basin for the period up to 2021. Decree of the President of Ukraine of 24.05.2012 № 4836.
2. Gurin VA, Stepanenko MG, Stepanenko MP Irrigation technology: a textbook. - Rivne: NUVGP, 2013. - 382 p.
3. Poletaev Yu.B., Kriulin KN, Patrina M.Yu. Irrigation by sprinkling: a textbook - St. Petersburg: state. Polytechnic University, 2003. - 53 p.
4. Gurin VA, Stepanenko MG, Stepanenko MP Irrigation technology: a textbook. - Rivne: NUVGP, 2013. - 382 p.
5. Karpenko SL, Lebedenko YO, Rudakova GV, Rudakova AA, Modeling the layout of active sprinkler equipment of a closed irrigation system. System technologies. 2021. Issue. 2 (133). Pp. 89–96.
6. Ledukhovskiy GV, Pospelov AA On the calculation of the operating characteristics of centrifugal pumps with frequency control of productivity. Heat supply news. 2013. Vip. 10 (158). Pp. 38-41.
7. Kolesnikov AI, Fedorov MN, Varfolomeev Yu.M. Energy saving in industrial and municipal enterprises: a textbook - M.: INFRA-M, 2005. - 124 p.
8. Karpenko SL, Rudakova GV, Polishchuk VM Modeling the influence of external factors on the hydraulic characteristics of a closed irrigation system. Applied questions of mathematical modeling. 2021. Vol.4, №2.1, pp. 119-127.
9. Sharov VS Ultra-high precision asynchronous electric motors. - M.: Gosenergoizdat, 1963. - 288 p.
10. Chumakov GA, Lunyaka KV, Krivenko SV Course of lectures on the subject "Hydraulics and hydro-, pneumatic drive": textbook - Kherson: KhNTU, 2009. - 121 p.
11. RD RD 26-07-254-83 Hydraulic characteristics and methods of calculation of hydrodynamic components of ball regulating and shut-off valves. [Valid from 01.07.1984]. Moscow, 1984. 18 p. (Information and documentation).

Received 17.03.2022.
Accepted 23.03.2022.

Mathematical model of closed irrigation system as an object of control

Irrigation machines of the Frigate series are mainly used in closed irrigation systems in the south of Ukraine. During the operation of such systems there are problems with pressure control in the system, the problem of remote control of irrigation. A possible solution to these problems is to control the pressure in the water supply line of sprinklers, by automatically controlling the pumping equipment and installing appropriate sensors (pressure, flow meters, etc.) for feedback to the control system. By controlling the pumping equipment that creates pressure in the mains, it is possible to ensure proper modes of operation in the water supply mains of the DMU. Appropriate software for statistical data collection and management is also needed to improve watering and remote monitoring of the system.

The aim of the study is to build a mathematical model of a closed irrigation system as an object of management, which will analyze the processes occurring in the system and evaluate the effectiveness of management methods being developed. The article considers the scheme of relationships between the main components of a closed irrigation system such as pump unit, distribution and irrigation pipeline, shut-off valves, universal sprinklers, control system with further mathematical description of each component. The main parameters of the system that affect its operation are identified. Set quality indicators that are put forward to the control system. The system as an object of control is analyzed, input, output and internal parameters of the system are revealed.

The mathematical model of ZSS is built from the considered models of components, gives the chance to analyze the processes proceeding in system, and to estimate efficiency of the management methods developed. To determine the adequacy of the mathematical model, which is created by the proposed approach, it is advisable to simulate the operation of the ZSS for real conditions in different modes of operation. To determine the properties of ZSS as an object of control, such as inertia, controllability, stability, observation, it is necessary to obtain a model of the complex in the space of states.

Карпенко Сергій Леонідович – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

Рудакова Ганна Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

Karpenko Serhii – graduate student of the Department of Automation, Robotics and Mechatronics, Kherson National Technical University.

Rudakova Hanna – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation, Robotics and Mechatronics, Kherson National Technical University.