

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-11>

УДК 626.845

Д. П. Журавель¹, д-р техн. наук
С. І. Пастушенко², д-р техн. наук
М. П. Артёмов³, д-р техн. наук
М. П. Волинкін⁴, інженер

ORCID: 0000-0002-6100-895X
ORCID: 0000-0002-1996-3558
ORCID: 0000-0002-2947-2664
ORCID: 0009-0006-4960-8537

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

²Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

³Державний біотехнологічний університет

⁴Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua

ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ СИСТЕМ КРАПЕЛЬНОГО ЗРОШЕННЯ

Анотація. У статті проведено системний аналіз досліджень відмов елементів водопостачання систем зрошення. Розглянуто основні типи відмов насосних станцій, трубопроводів, фільтраційних вузлів, краплинних ліній та систем автоматизації. Проаналізовано причини виникнення відмов, їх вплив на ефективність функціонування зрошувальних систем та методи оцінювання надійності. Встановлено ключові фактори, що визначають інтенсивність відмов, зокрема якість води, гідравлічні режими та рівень технічного обслуговування. Запропоновано напрями підвищення експлуатаційної надійності систем водопостачання.

Ключові слова: інтенсивність відмов, насосні станції, трубопроводи, краплинне зрошення, водопостачання, надійність, гідравлічні режими технічне обслуговування.

Постановка проблеми. Проблема дослідження надійності водопостачання зрошувальних систем набуває особливої актуальності в умовах змін клімату, зростання дефіциту водних ресурсів та підвищення вимог до ефективності сільськогосподарського виробництва. Стабільність функціонування зрошувальних систем безпосередньо залежить від безвідмовної роботи елементів водопостачання – водозабірних споруд, насосних станцій, напірних і розподільчих трубопроводів, фільтраційного обладнання, запірно-регулюючої арматури та засобів автоматизації. Порушення роботи хоча б одного з цих компонентів призводить до зниження тиску та витрати води, нерівномірності поливу, перевитрат електроенергії, аварійних простоїв і, як наслідок, до зменшення врожайності сільськогосподарських культур та економічних збитків. Водночас значна частина існуючих зрошувальних систем характеризується високим ступенем фізичного та морального зношування, що підвищує ймовірність відмов і ускладнює забезпечення стабільних гідравлічних режимів. Особливу небезпеку становлять приховані дефекти трубопроводів, корозійні процеси, кавітаційні явища в насосному обладнанні, гідравлічні удари, а також засмічення фільтраційних елементів через низьку якість води. Недостатній рівень автоматизації та технічної діагностики призводить до несвоєчасного виявлення несправностей і переходу локальних дефектів у масштабні аварії. Незважаючи на наявність окремих досліджень у сфері теорії надійності та експлуатації гідротехнічних систем, питання комплексної оцінки надійності саме систем водопостачання зрошення залишаються недостатньо розробленими, зокрема в частині врахування реальних умов експлуатації, змінних навантажень і впливу якості води на довговічність обладнання. Існує потреба у вдосконаленні методів прогнозування відмов, визначенні інтенсивності їх виникнення, оцінюванні показників безвід-



мовності, довговічності та ремонтпридатності, а також у розробленні науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення коефіцієнта готовності систем. Таким чином, проблема дослідження надійності водопостачання зрошувальних систем полягає у необхідності створення ефективної методології оцінювання та прогнозування технічного стану їх елементів з урахуванням гідравлічних, конструктивних, експлуатаційних і природно-кліматичних чинників, що дозволить забезпечити безперебійне функціонування систем зрошення, раціональне використання водних та енергетичних ресурсів і підвищення економічної результативності аграрного виробництва.

Аналіз останніх досліджень. Системи зрошення функціонують у складних гідравлічних і експлуатаційних умовах, що зумовлює поступове зношування обладнання та виникнення аварійних ситуацій. Надійність роботи водозабірних споруд, насосних станцій, трубопроводів, фільтраційного обладнання, запірно-регулюючої арматури та систем автоматизації безпосередньо впливає на рівномірність подачі води, енергоспоживання, довговічність технічних засобів і врожайність сільськогосподарських культур [1–5]. Відмови можуть мати як раптовий характер, наприклад унаслідок гідроудару або руйнування труб, так і поступовий – через корозію, ерозійне зношування, старіння матеріалів чи засмічення фільтрів [6–10]. Дослідження показують, що найбільш вразливими елементами є трубопроводи та насосне обладнання, на які припадає основна частка експлуатаційних пошкоджень. Для насосів характерними причинами відмов є зношування підшипників, кавітаційні явища, порушення центрування валів, перевантаження електродвигуна та робота без достатнього водопостачання [11–16]. У трубопровідних мережах переважають корозійні процеси, механічні пошкодження, негативний вплив гідравлічних ударів і деградація полімерних матеріалів під дією температурних коливань та ультрафіолетового випромінювання. Значну роль у зниженні надійності відіграє якість води, зокрема підвищений вміст завислих часток і солей, що спричиняє інтенсивне засмічення фільтрів і краплинних емітерів [17–20]. У наукових дослідженнях для оцінювання надійності застосовують статистичні та ймовірнісні методи, зокрема визначення середнього напрацювання на відмову, інтенсивності відмов, побудову функцій розподілу часу безвідмовної роботи, використання розподілу Вейбулла, а також аналіз видів і наслідків відмов. Отримані дані дозволяють прогнозувати ресурс обладнання, оптимізувати графіки технічного обслуговування та зменшувати ризик аварій. Важливим чинником підвищення експлуатаційної надійності є впровадження автоматизованих систем контролю тиску й витрати води, застосування частотних перетворювачів для регулювання режимів роботи насосів, використання корозійностійких матеріалів і своєчасна діагностика технічного стану елементів системи [21–23]. Комплексний підхід до аналізу відмов, що поєднує технічний моніторинг, математичне моделювання та організаційні заходи, забезпечує підвищення коефіцієнта готовності систем зрошення та зниження експлуатаційних витрат. Таким чином, систематичне дослідження причин і закономірностей відмов елементів водопостачання є необхідною умовою забезпечення стабільної та економічно ефективної роботи сучасних зрошувальних систем.

Формулювання цілей статті. Метою статті є дослідження характеристики відмов елементів водопостачання для систем зрошення.

Основна частина. Надійність агрегату визначається надійністю всіх його підсистем, причому відмова будь-якої з них призводить до порушення нормального функціонування всього агрегату. Кожна підсистема може перебувати у двох станах – працездатному або непрацездатному, а ймовірність перебування у кожному з них підлягає кількісній оцінці. Водночас неможливо заздалегідь визначити момент відмови конкретної підсистеми, що зумовлює необхідність проведення діагностики та ремонту. З математичної точки зору такі процеси доцільно описувати як марковські, використовуючи відповідні графи станів.

Оскільки потоки подій, що зумовлюють переходи системи між станами, є найпростішими пуассонівськими та характеризуються відповідними інтенсивностями λ_{ij} і $m_{1,0}$, зрошувальне обладнання можна розглядати як систему з обмеженою кількістю дискретних станів. При цьому припускається, що всі переходи між станами s_i в s_j відбуваються під впливом таких потоків подій з певними інтенсивностями λ_{ij} ($i, j = 0, 1, 2, 3$). Зокрема, перехід системи з одного стану до іншого пов'язаний із потоком відмов окремого вузла, тоді як зворотний перехід обумовлюється потоком завершення його ремонту. Вже згадана система має одинадцять можливих станів: $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$.

Випадковий процес переходів між станами доцільно описувати через визначення ймовірностей цих станів, що змінюються в часі. $P_0(t), P_1(t) \dots P_{10}(t)$.

Або $P_1(t) = P\{S(t) = S_i\}$, где $P_1(t)$ – ймовірність того, що система S у момент часу t перебуває в стані S_i . Схему графа станів зрошувальної системи подано на рис. 1.

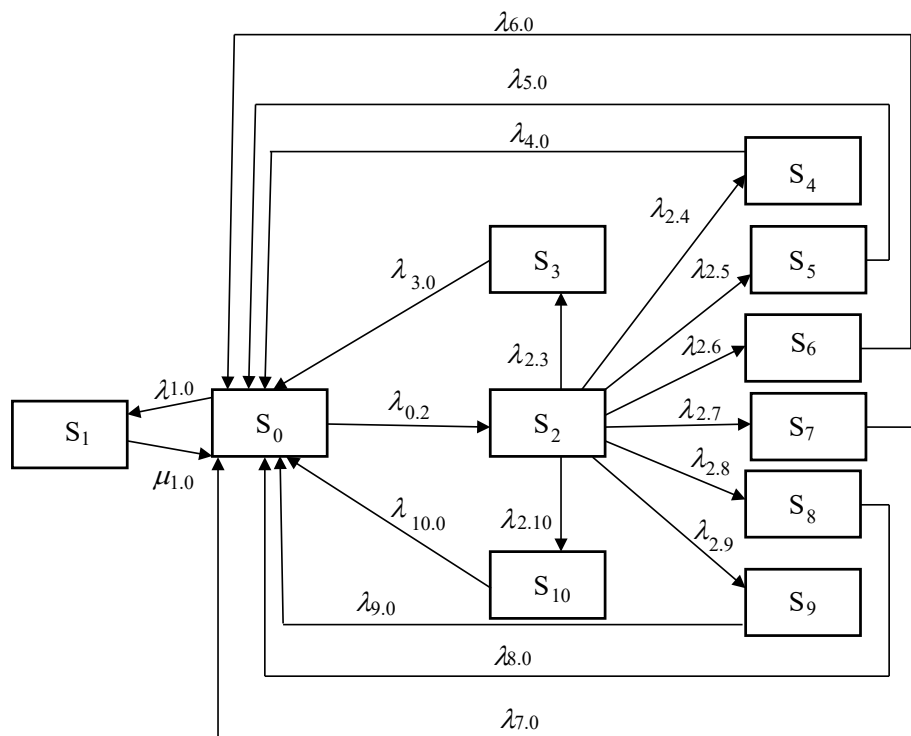


Рис. 1. Граф станів зрошувальної системи

S_0 – зрошувальна система (ЗС) перебуває у справному стані та функціонує; S_1 – ЗС є справною, але тимчасово не працює (простій); S_2 – ЗС перебуває в несправному стані та не функціонує (проводиться діагностування відмови); S_3 – ЗС не працює через відмову головного занурюваного насоса; S_4 – ЗС не функціонує внаслідок відмови поверхневого відцентрового насоса; S_5 – ЗС несправна, через відмову електромагнітного клапану; S_6 – ЗС несправна, через відмову вузла підготовки внесення добрив; S_7 – ЗС несправна, через відмову первинного перетворювача ступеню забруднення води; S_8 – ЗС несправна, через відмову первинного перетворювача вологості ґрунту; S_9 – ЗС несправна, через відмову дренажного відцентрового насосу; S_{10} – ЗС несправна, через відмову допоміжного відцентрового насосу.

Отримаємо систему диференціальних рівнянь Колмогорова для ймовірностей станів: в лівій частині кожного з них стоїть похідна ймовірності i -го стану. У правій частині – сума добутоків ймовірностей всіх станів (з яких йдуть стрілки в даний стан) на інтенсивності відповідних



потоків подій, мінус сумарна інтенсивність всіх потоків, які виводять систему з даного стану, помножена на ймовірність даного (i -го стану).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_{1\mu_0}(t) + \lambda_{3.0}P_3(t) + \lambda_{4.0}P_4(t) + \lambda_{5.0}P_5(t) + \lambda_{6.0}P_6(t) + \\ \lambda_{7.0}P_7(t) + \lambda_{8.0}P_8(t) + \lambda_{9.0}P_9(t) + \lambda_{10.0}P_{10}(t) - \lambda_{0.1}P(t) - \lambda_{0.2}P_0(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{01}P_0(t) - \mu_{1.0}P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{02}P_0(t)(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{2.3}P_2(t) - \lambda_{3.0}P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{2.4}P_2(t) - \lambda_{4.0}P_4(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} = \lambda_{2.5}P_2(t) - \lambda_{5.0}P_5(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{2.6}P(t) - \lambda_{6.0}P(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} = \lambda_{2.7}P(t) - \lambda_{7.0}P_7(t) \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = \lambda_{2.8}P_2(t) - \lambda_{8.0}P(t) \\ \frac{dP_9(t)}{dt} = \lambda_{2.9}P(t) - \lambda_{9.0}P_9(t) \\ \frac{dP_{10}(t)}{dt} = \lambda_{2.1}P(t) - \lambda_{10.0}P_{10}(t) \end{array} \right. \quad (1)$$

Очевидно, що для будь-якого моменту t сума ймовірностей всіх станів дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=0}^{i=10} P_i(t) = 1 \quad (2)$$

Для розв'язання системи рівнянь задаємо початкові умови: у початковий момент часу система перебуває у стані S_0 з імовірністю $P_1(0) = 1$.

Відповідно до умови нормування, імовірності перебування в інших станах дорівнюють:

$$P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = P_7(0) = P_8(0) = P_9(0) = P_{10}(0) = 0.$$

Використовуючи рівняння Колмогорова є можливість знайти ймовірності станів як функції часу.

В даному випадку інтерес представляють ймовірності системи $P_i(t)$ в граничному стаціонарному режимі ($t \rightarrow \infty$):

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t). \quad (3)$$

Такий підхід характерний для стаціонарного режиму експлуатації, за якого зрештувальна система може переходити між станами, однак імовірності перебування в кожному з них залишаються незмінними. В зв'язку з тим, що гранична ймовірності постійні:

$$\frac{dP_i}{dt} = 0, \quad (4)$$

то замінюючи в рівняннях Колмогорова їх похідні нульовими значеннями, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь.



$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda_{01} + \lambda_{02})P_0 = \mu_{10}P_1 + \lambda_{30}P_3 + \lambda_{40}P_4 + \lambda_{50}P_5 + \lambda_{60}P_6 + \\ \lambda_{70}P_7 + \lambda_{80}P_8 + \lambda_{90}P_9 + \lambda_{100}P_{10} \\ \mu_{10}P_1 = \lambda_{01}P_0 \\ (\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})P_2 = \lambda_{02}P_0 \\ \lambda_{30}P_3 = \lambda_{2.3}P_2 \\ \lambda_{40}P_4 = \lambda_{2.4}P_2 \\ \lambda_{50}P_5 = \lambda_{2.5}P_2 \\ \lambda_{60}P_6 = \lambda_{2.6}P_2 \\ \lambda_{70}P_7 = \lambda_{2.7}P_2 \\ \lambda_{80}P_8 = \lambda_{2.8}P_2 \\ \lambda_{90}P_9 = \lambda_{2.9}P_2 \\ \lambda_{100}P_{10} = \lambda_{2.1}P_2 \end{array} \right. \quad (5)$$

Ми сформуваємо систему алгебраїчних рівнянь, що містить одинадцять невідомих. $P_0 \dots P_{10}$.

До цієї системи рівнянь додаємо додаткові умови: $\sum_{i=0}^{i=10} P_i(t) = 1$ (6)

З другого рівняння системи випливає:

$$P_0 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \right) \quad (7)$$

Дальше

$$P_3 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} \right) \quad (8)$$

$$P_4 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{40}} \right) \quad (9)$$

$$P_5 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{50}} \right) \quad (10)$$

$$P_6 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{60}} \right) \quad (11)$$

$$P_7 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.7}}{\lambda_{70}} \right) \quad (12)$$

$$P_8 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.8}}{\lambda_{80}} \right) \quad (13)$$

$$P_9 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} \right) \quad (14)$$

$$P_{10} = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \quad (15)$$

Вирішуємо систему, підставляючи в нормувальну умову всі ймовірності, які виражені через P_2 :



$$\begin{aligned}
& P_2 \frac{(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})}{\lambda_{02}} + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}. \\
& P_2 \frac{(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})}{\lambda_{02}} + P_2 + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} \right) + \\
& + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{40}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{50}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{60}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.7}}{\lambda_{70}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.8}}{\lambda_{80}} \right) + \\
& + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) = 1. \tag{16}
\end{aligned}$$

Звідси:

$$\begin{aligned}
& P_2 \frac{(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})}{\lambda_{02}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + P_2 + \\
& + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{40}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{50}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{60}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.7}}{\lambda_{70}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.8}}{\lambda_{80}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) = 1. \tag{17}
\end{aligned}$$

Після перетворення, маємо:

$$P_2 \left[\frac{\lambda_{2.3} + \dots + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \right] = 1 \tag{18}$$

Звідси, P_2 дорівнює:

$$P_2 = \frac{1}{\left[\left[\frac{\lambda_{2.3} + \dots + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \right] \right]} \tag{19}$$

$$P_2 = \left[\frac{\lambda_{2.3} + \dots + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \right]^{-1} \tag{20}$$

Маючи P_2 знаходимо $P_0, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$.

Ймовірність P_1 визначаємо з умови нормування як різницю:

$$P_1 = 1 - (P_0 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}). \tag{21}$$

Отримані ймовірності станів покладені в основу визначення комплексних показників надійності зрощувальної системи. Тому коефіцієнт готовності K_G , є сумою ймовірностей працездатних станів, при справній і працюючій зрощувальній системі, а також при справній, але не працюючій зрощувальній системі (простою), з будь-яких причин не технічного характеру:

$$K_G = P_0 + P_1 \tag{22}$$

Підставляючи значення ймовірностей у формулу, отримуємо:

$$K_G = P_0 + [1 - (P_0 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10})]. \tag{23}$$

Після перетворення виразу маємо:

$$K_G = 1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5 - P_6 - P_7 - P_8 - P_9 - P_{10}. \tag{24}$$



Виразивши ймовірності через P_2 , отримуємо:

$$K_{\Gamma} = 1 - P_2 \left(1 - \frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \frac{\lambda_{2,4}}{\lambda_{40}} + \frac{\lambda_{2,5}}{\lambda_{50}} + \frac{\lambda_{2,6}}{\lambda_{60}} + \frac{\lambda_{2,7}}{\lambda_{70}} + \frac{\lambda_{2,8}}{\lambda_{80}} + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right). \quad (25)$$

Підставивши у рівняння значення P_2 , які виражені через інтенсивності, отримуємо кінцеву формулу:

$$K_{\Gamma} = \frac{\lambda_{2,3} + \lambda_{2,4} + \lambda_{2,5} + \lambda_{2,6} + \lambda_{2,7} + \lambda_{2,8} + \lambda_{2,9} + \lambda_{2,1}}{\lambda_{2,3} + \dots + \lambda_{2,9} + \lambda_{2,1} + \frac{\lambda_{02}}{\left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}\right)} \left(1 + \frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}}\right)}. \quad (26)$$

При розгляді надійності зрошувальних систем слід також звернути увагу на ще один комплексний показник – коефіцієнт технічного використання $K_{\text{т.в.}}$.

$$K_{\text{т.в.}} = K_{\Gamma} - (P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}). \quad (27)$$

Підставляючи у рівняння значення коефіцієнта готовності, отримуємо:

$$K_{\text{т.в.}} = 1 - 2(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}). \quad (28)$$

Звідси:

$$K_{\text{т.в.}} = 1 - 2 P_2 \cdot \left(\frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \frac{\lambda_{2,4}}{\lambda_{40}} + \frac{\lambda_{2,5}}{\lambda_{50}} + \frac{\lambda_{2,6}}{\lambda_{60}} + \frac{\lambda_{2,7}}{\lambda_{70}} + \frac{\lambda_{2,8}}{\lambda_{80}} + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right). \quad (29)$$

Підставляючи ймовірність P_2 , виражену через інтенсивності, отримуємо:

$$K_{\text{т.в.}} = 1 - \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \frac{\lambda_{2,4}}{\lambda_{40}} + \frac{\lambda_{2,5}}{\lambda_{50}} + \frac{\lambda_{2,6}}{\lambda_{60}} + \frac{\lambda_{2,7}}{\lambda_{70}} + \frac{\lambda_{2,8}}{\lambda_{80}} + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right)}{\frac{\lambda_{2,3} + \dots + \lambda_{2,9} + \lambda_{2,1}}{\lambda_{02}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right)}. \quad (30)$$

Для розрахунку інтенсивностей переходів λ_i і μ_{10} досліджуваної зрошувальної системи між станами застосовуємо таке співвідношення:

$$\lambda_i = (T_i)^{-1}; \quad (31)$$

$$\mu_{10} = T_{10}^{-1}. \quad (32)$$

де T_i – середня тривалість виконання i -ї операції.

Далі розраховуємо ймовірності переходів зрошувальної системи з одного стану в інший, без модернізації, тобто існуючої за формулою (16):

$$P_2 = \left[\left(\frac{0,025 + 0,02 + 0,05 + 0,0125 + 0,0143 + 0,063 + 0,05 + 0,018}{0,01} \right) \left(1 + \frac{0,19}{1} \right) + 1 + \frac{0,025}{0,0185} + \frac{0,02}{0,0084} + \frac{0,05}{0,067} + \frac{0,0125}{0,0042} + \frac{0,0143}{0,0084} + \frac{0,063}{0,2} + \frac{0,05}{0,034} + \frac{0,018}{0,0084} \right]^{-1} = 0,022.$$

Звідси, відповідно до формул (18 ... 25) обчислюємо ймовірності:

$$P_3 = 0,044; P_4 = 0,052; P_5 = 0,0165; P_6 = 0,066; P_7 = 0,0374; P_8 = 0,00693; P_9 = 0,032; P_{10} = 0,047.$$

По формулі (17) находимо P_0 , $P_0 = 0,022 \cdot 25,3 = 0,56$.



P_1 згідно формули (31) дорівнює $P_1 = 1 - 0,9 = 0,1$.

Звідси коефіцієнт готовності для існуючої зрошувальної системи, обчислюємо за формулою (32):

$$T_r = 0,056 + 0,1 = 0,66.$$

Розраховуємо ймовірності переходів модернізованої зрошувальної системи з одного стану в інший, за формулою (26):

$$P_2 = \left[\left(\frac{0,033 + 0,025 + 0,067 + 0,0153 + 0,02 + 0,1 + 0,056 + 0,025}{0,011} \right) \left(1 + \frac{0,19}{1} \right) + 1 + \frac{0,033}{0,0125} + \frac{0,025}{0,0084} + \frac{0,067}{0,067} + \frac{0,0153}{0,0042} + \frac{0,02}{0,0084} + \frac{0,01}{0,2} + \frac{0,056}{0,034} + \frac{0,025}{0,0084} \right]^{-1} = 0,017.$$

Для визначення значення часу на технологічне обслуговування та ремонт окремих вузлів зрошувальної системи і визначення коефіцієнта готовності, були використані результати експлуатаційних досліджень, а також експертні оцінки фахівців з ремонту та обслуговування системи зрошення (табл. 1 і 2).

Таблиця 1

Середні показники тривалості виконання технологічних операцій з діагностики зрошувальної системи

Найменування операцій	Характер використання системи зрошення			
	Існуючої		Модернізованої	
	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}
1. Діагностування несправності і підготовка до ремонту головного занурювального насосу	$T_{2,3} = 40$	0,025	$T_{2,3} = 30$	0,033
2. Діагностування несправності і підготовка до ремонту поверхневого відцентрового насосу	$T_{2,4} = 50$	0,02	$T_{2,4} = 40$	0,025
3. Діагностування несправності і підготовка до ремонту фільтра електромагнітного клапану	$T_{2,5} = 20$	0,05	$T_{2,5} = 15$	0,067
4. Діагностування несправності і підготовка до ремонту вузла підготовки внесення добрив	$T_{2,6} = 80$	0,0125	$T_{2,6} = 65$	0,0153
5. Діагностування несправності і підготовка до ремонту первинного перетворювача ступеню забруднення води	$T_{2,7} = 70$	0,0143	$T_{2,7} = 50$	0,02
6. Діагностування несправності і підготовка до ремонту дренажного відцентрового насосу	$T_{2,8} = 16$	0,063	$T_{2,8} = 10$	0,1
7. Діагностування несправності і підготовка до ремонту допоміжного відцентрового насосу	$T_{2,9} = 20$	0,05	$T_{2,9} = 18$	0,056
8. Діагностування несправності і підготовка до ремонту краплинних ліній	$T_{2,1} = 55$	0,018	$T_{2,1} = 40$	0,025

Таблиця 2

Середні показники тривалості виконання технологічних операцій з ремонту зрошувальної системи

Найменування операцій	Характер використання системи зрошення			
	Існуючої		Модернізованої	
	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}
1. Ремонт головного занурювального насосу	$T_{30} = 80$	0,0125	$T_{30} = 80$	0,0125
2. Ремонт поверхневого відцентрового насосу	$T_{40} = 120$	0,0084	$T_{40} = 120$	0,0084
3. Ремонт електро-магнітного клапану	$T_{50} = 15$	0,067	$T_{50} = 15$	0,067
4. Ремонт первинного перетворювача ступеню забруднення води	$T_{60} = 240$	0.0042	$T_{60} = 240$	0.0042
5. Ремонт вузла підготовки внесення добрив	$T_{70} = 120$	0,0084	$T_{70} = 120$	0,0084
6. Ремонт допоміж-ного відцентрового насосу	$T_{80} = 5$	0,2	$T_{80} = 5$	0,2
7. Ремонт клапана	$T_{90} = 30$	0,034	$T_{90} = 30$	0,034
8. Ремонт краплинних ліній	$T_{100} = 120$	0,0084	$T_{100} = 120$	0,0084
9. Підготовка до діагностики ремонтних робіт	$T_{02} = 100$	0,01	$T_{02} = 90$	0,011

Звідси, відповідно до формул (8...15) обчислюємо ймовірності:

$$P_3 = 0,045; P_4 = 0,05; P_5 = 0,017; P_6 = 0,062; P_7 = 0,04;$$

$$P_8 = 0,0025; P_9 = 0,028; P_{10} = 0,05.$$

По формулі (7) находимо P_0 , $P_0 = 0,017 \cdot 34,13 = 0,525$.

P_3 згідно формули (21) дорівнює $P_3 = 1 - 0,825 = 0,175$.

Звідси коефіцієнт готовності для модернізованої системи зрошення обчислюємо згідно з формулою (22):

$$T_r = 0,53 + 0,175 = 0,71.$$

Висновки:

1. Найбільш уразливими елементами систем водопостачання є насосні станції та краплинні лінії.

2. Ключовими факторами виникнення відмов є якість води, порушення гідравлічних режимів та недостатнє технічне обслуговування.

3. Використання методів теорії надійності дозволяє прогнозувати ресурс обладнання та знижувати ризик аварій.

4. Системний підхід до управління технічним станом забезпечує підвищення ефективності та довговічності зрошувальних систем.

5. Коефіцієнт готовності для існуючої системи зрошення становив 0,66, а для модернізованої 0,71.

Список використаних джерел

2. Журавель Д.П. та ін. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : підручник для здобувачів вищої освіти. Київ : ЦП «Компринт», 2021. 448 с., іл.
- Дідур В.А. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Мелітополь : ТОВ «Колор Принт», 2019. 468 с.
- Дідур В.А. Гідравліка : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 624 с.



4. Дідур В.А. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі : підручник. 2008. 577 с.
5. Бондар А.М.. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства* : загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125–131.
6. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko, Andrei Bondar. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture / Modern Development Paths of Agricultural Production. *Springer Nature Switzerland AG.*, 2019. P. 29–40.
7. Kyrylo Samoichuk, Olga Viunyk, Dmytro Milko, Andrii Bondar Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 142–148.
8. Dmitry Milko, Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1/12(103). P. 24–29.
9. Dmytro Milko, Oleksandr Sclyar, Radmila Sclyar, Ganna Pedchenko. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH – Agricultural Engineering. National Institute Of Research-Development For Machines And Installations Designed To Agriculture And Food Industry – INMA Bucharest*, Vol. 60, no. 1 / 2020. P. 269–274.
10. Kyrylo Samoichuk, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksiienko, Serhii Petrychenko. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 633–640.
11. Бондар А.М. Покращення та оцінка якісних показників відпрацьованих автотракторних олив для сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 15 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-6.
12. Бондар А.М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 19 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-10.
13. Бондар А.М., Дашивець Г.І., Паніна В.В. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. С. 85–97. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-16.
14. Dmytro Zhuravel. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. 18 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-5.
15. Kuznetsov, M., Lysenko, O., Chebanov, A. (2021). Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (114)), 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.
16. Бондар А.М., Дашивець Г.І., Паніна В.В. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 2. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-2.
17. Samoichuk, K.; Petrychenko, S.; Bondar, A.; Hutsol, T.; Kubo' n, M.; Niemiec, M.; Mykhailova, L.; Gródek-Szostak, Z.; Sorokin, D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022, 15, 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.
18. Karpań, M.; Klimek, K.; Maj, G.; Bondar, A.; Lemeshchenko-Lagoda, V.; Boltianskyi, B.; Boltianska, L.; Syrotyuk, H.; Syrotyuk, S.; et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022, 15, 3416. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093416>.
19. Журавель Д.П. Вплив технічного обслуговування і ремонту на надійність машин та обладнання при використанні біологічних рідин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 9 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-3.
20. Журавель Д.П. Рациональне використання біологічних олив для мобільних енергетичних засобів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 17 с. DOI: 10.31388 / 2220-8674-2020-1-9.



21. Poliakov, A., Volokh, V., Andreev, A., та ін. Identifying patterns in the structural-phase transformations when processing oxide doped waste with the use of carbon reducer. (2024). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(12 (131), 25–30.

22. Rebenko, V., Lukianenko, I., Volokh, V., та ін. Establishing patterns of structural-phase transformations when processing technogenic waste of high-speed steels by carbon thermal reduction. (2025). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 12 (136), 6–11.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



D. Zhuravel¹, S. Pastushenko², M. Artomov³, M. Volynkin⁴

¹*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

²*Separate subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Brzezany Agrotechnical Institute”*

³*State University of Biotechnology*

⁴*Higher Educational Institution “Podillia State University”*

FAILURE CHARACTERISTICS OF WATER SUPPLY ELEMENTS FOR DRIP IRRIGATION SYSTEMS

Summary

The article conducts a systematic analysis of studies of failures of water supply elements of irrigation systems. The main types of failures of pumping stations, pipelines, filtration units, drip lines and automation systems are considered. The causes of failures, their impact on the efficiency of irrigation systems and methods for assessing reliability are analyzed. Key factors that determine the intensity of failures are identified, in particular water quality, hydraulic modes and the level of maintenance. Directions for increasing the operational reliability of water supply systems are proposed. The stability of irrigation systems directly depends on the trouble-free operation of water supply elements – water intake structures, pumping stations, pressure and distribution pipelines, filtration equipment, shut-off and control valves and automation equipment. Failure of at least one of these components leads to a decrease in pressure and water consumption, uneven irrigation, excess electricity consumption, emergency downtime and, as a result, to a decrease in crop yields and economic losses. At the same time, a significant part of existing irrigation systems is characterized by a high degree of physical and moral wear and tear, which increases the likelihood of failures and complicates the provision of stable hydraulic modes. Hidden defects in pipelines, corrosion processes, cavitation phenomena in pumping equipment, water hammer, as well as clogging of filtration elements due to low water quality are of particular danger. Insufficient level of automation and technical diagnostics leads to untimely detection of malfunctions and transition of local defects into large-scale accidents. Despite the existence of separate studies in the field of reliability theory and operation of hydraulic systems, the issues of comprehensive assessment of the reliability of irrigation water supply systems remain insufficiently developed, in particular in terms of taking into account real operating conditions, variable loads and the impact of water quality on the durability of equipment. There is a need to improve methods of predicting failures, determining the intensity of their occurrence, assessing indicators of failure-freeness, durability and maintainability, as well as developing scientifically based recommendations for increasing the availability coefficient of systems.

Keywords: failure rate, pumping stations, pipelines, drip irrigation, water supply, reliability, hydraulic modes, maintenance.