

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-19>

УДК 637.5.02

САВЕНКО Олег

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>

МОРКУН Наталя

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1261-1170>

КОРЕЦЬКА Людмила

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4284-4936>

ПАНЮШКІН Владислав

Хмельницький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДОПОСТАЧАННЯМ

У статті проведено дослідження та запропоновано метод підвищення ймовірності відмовостійкості автоматизованої керування водопостачанням. Підвищення функціональної безпеки та надійності контуру контролю рівня води у резервуарі, а отже і автоматизованої системи в цілому, вдалось досягти за рахунок використання резервування елементів контуру.

Ключові слова: функціональна безпека, надійність, ймовірність безвідмовної роботи, резервування, автоматизована система.

SAVENKO Oleg, MORKUN Natalia, KORETSKA Liudmyla, PANIUSHKIN Vladislav
Khmelnitskyi National University

INCREASING THE RELIABILITY AND FUNCTIONAL SAFETY OF THE AUTOMATED WATER SUPPLY MANAGEMENT SYSTEM

In the article, a study was conducted and a method of increasing the probability of fault tolerance of automated water supply management was proposed. Increasing the functional safety and reliability of the water level control circuit in the tank, and therefore the automated system as a whole, was achieved due to the use of redundancy of the circuit elements. In the context of modern industry and everyday life, increasing the reliability and functional safety of automated control systems is an extremely urgent task. Automated systems have high requirements for reliability and fault tolerance. Therefore, at the stages of development, design and operation of automated systems, it is necessary to evaluate the parameters of reliability of functioning. To assess the probability of system failures, system reliability, and failure risks, the functional safety norms set forth in the IEC 61508, IEC 61511 standards are used. As a result of the conducted research, it was established that with the use of redundancy of elements of the water level control circuit in the tank, it was possible to achieve the value of the probability of failure-free operation contour above 0.95.

Keywords: functional safety, reliability, probability of failure-free operation, redundancy, automated system.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У контексті сучасної промисловості та побуту підвищення надійності та функціональної безпеки автоматизованих систем керування є надзвичайно актуальним завданням. Це пов'язано із наступними факторами: безпека персоналу, попередження аварій та аварійних ситуацій, ефективність виробництва, дотримання існуючих нормативів та стандартів, захист автоматизованої системи від кіберзагрози. Зокрема, підвищення надійності та функціональної безпеки автоматизованої системи керування водопостачанням є важливим з наступних причин: забезпечення населення (виробництва) доступу до чистої води, забезпечення санітарних умов, економія ресурсів, швидке реагування на зміну рівня споживання води, що забезпечує стійкість системи водопостачання в різних умовах, профілактичне обслуговування із використанням систем моніторингу, контролю та діагностики.

До автоматизованих систем висуваються високі вимоги щодо надійності та відмовостійкості [1-3]. Тому на етапах розробки, проектування та експлуатації автоматизованих систем необхідно проводити оцінку параметрів надійності функціонування. Для оцінки ймовірності відмов системи, надійності системи, ризиків збою використовують норми функціональної безпеки, що викладені у стандартах IEC 61508 [4], IEC 61511 [5].

Виклад основного матеріалу

Під час проектування системи автоматизації водопостачання потрібно виконати наступні завдання:

- ✓ підтримання у водопроводі заданого тиску,

- ✓ подача води у водопровід споживача повинна бути безперервною,
- ✓ захист від аварійних ситуацій, які можуть виникати у свердловині, наприклад, переповнення водою резервуара, нестача води та інші,
- ✓ можливість встановлення системи в режим ручного керування технологічним процесом з автоматичного,
- ✓ можливість керувати та контролювати з єдиного диспетчерського пункту технологічний процес.

Головною складовою об'єкта автоматизації є свердловина. У роботі розглядається система водопостачання із двома групами свердловин, в кожній з яких є по дві свердловини, які розміщені одна від одної на відстані 0,5 км. Кожна із свердловин обладнана занурювальними насосами, за допомогою яких відбувається забір води із свердловини.

Наступними складовими об'єкта автоматизації є резервуар та насосна станція. Резервуар використовується для накопичення певного заданого рівня води і з'єднаний з усіма свердловинами із використанням трубопроводів та насосної станції першого підйому, а також із насосною станцією другого підйому.

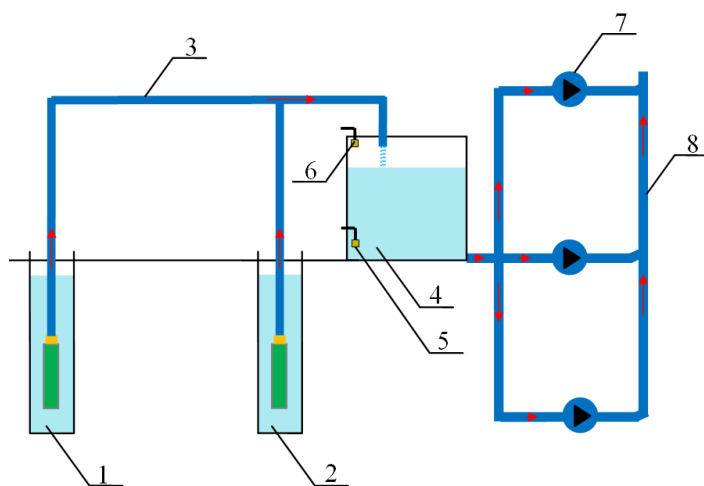


Рис. 1 – Схематичне зображення автоматизованої системи керування водопостачанням

Насосна станція другого підйому є заключною ланкою автоматизованої системи керування водопостачанням. Приміщення станції другого підйому обладнане необхідними насосами, які з'єднані із резервуаром за допомогою трубопроводу. Із використанням насосів відбувається здійснення безпосереднього забору із резервуару води та направлення її у трубопровід споживача. Без використання сучасних засобів автоматизації та підходів поставлені завдання вирішити неможливо. На рис. 1 наведено схематичне зображення об'єкта автоматизації – автоматизованої системи керування водопостачанням, де 1 – перша група свердловин; 2 – друга група свердловин; 3 – трубопровід від свердловин; 4 – резервуар; 5 – давач нижнього рівня води у резервуарі; 6 – давач верхнього рівня води у резервуарі; 7 – насоси для постачання води із резервуару споживачам; 8 – трубопровід.

На насосних станціях відбувається автоматизація:

- ✓ приймання сигналів від вимірювальних пристроїв та передача сигналів на диспетчерський пункт;
- ✓ підтримання та контроль заданих параметрів (наприклад, подачі води, рівня, напору тощо);
- ✓ процесів пуску та зупинки насосних агрегатів та допоміжних насосних установок.

Для спостереження та можливою контролю за станом системи використовуються давачі, які перетворюють контрольоване значення параметру у електричний сигнал, який далі із використанням контролера та відповідної побудованої логіки перетворюється у сигнал керування виконавчим механізмом.

Розглянемо алгоритм відкачування води із резервуару (рис. 2), для забезпечення подачі її кінцевим споживачам.

Автоматизована система керування водопостачанням у своєму складі містить:

- резервуар;
- давачі нижнього та верхнього рівня, що розміщені на резервуарі;
- 3 насоси (двигуни), що забезпечують відкачування води;
- кнопка «Старт»;
- кнопка «Стоп»;
- кнопка «Аварійне відкачування»;

3 сигнальні лампи: перша лампа сигналізує про режим роботи системи (режим «Робочий» - лампа вимкнена, режим «Швидке відкачування» - лампа ввімкнена, режим «Аварійне відкачування» - лампа миготить з періодом 1 с); друга – про несправність одного із давачів верхнього рівня; третя - про несправність одного із давачів нижнього рівня. Із використанням кнопочних вимикачів та даних, що отримані з давачів верхнього та нижнього рівнів, відбувається керування режимами роботи автоматизованої системи керування водопостачальною станцією.

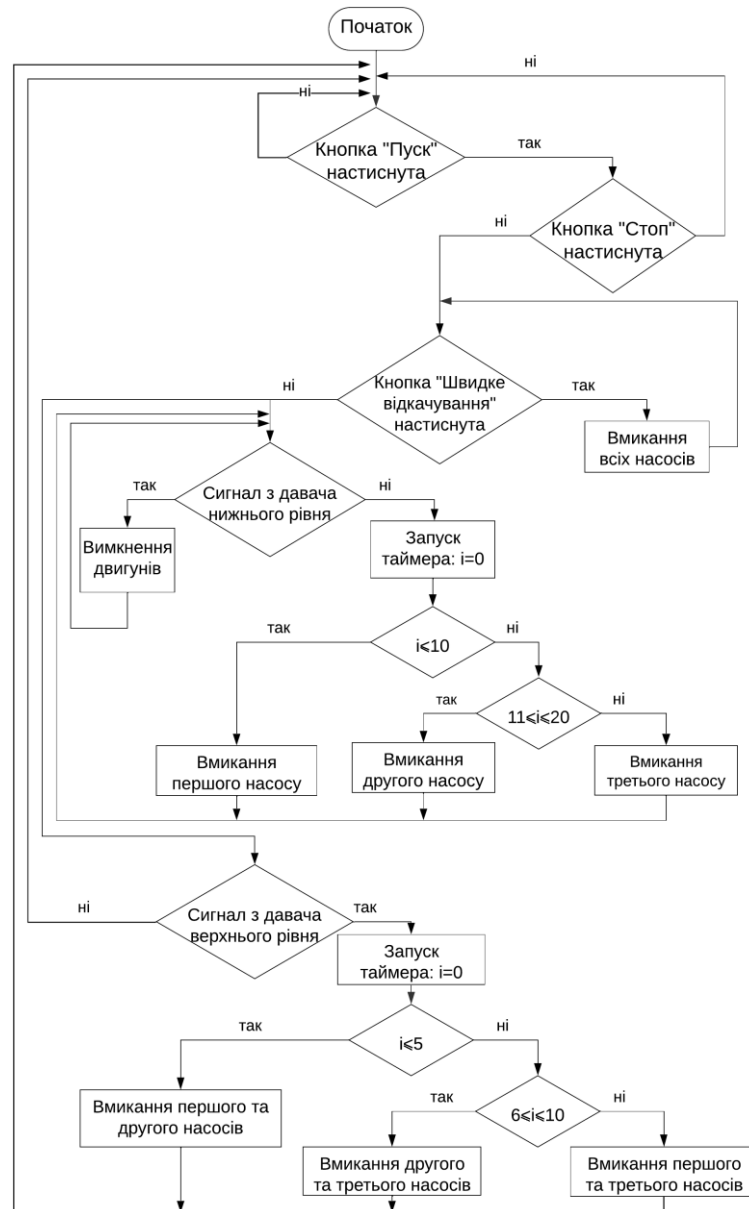


Рис. 2. Алгоритм функціонування автоматизованої системи керування водопостачальною станцією

Сигнали, що отримані від датчиків верхнього та нижнього рівнів, сигналізують про заповнення резервуару або про те, що він порожній, відповідно.

При короткочасному натисканні на кнопку «Старт» відбувається початок роботи автоматизованої системи, а при натисканні на кнопку «Стоп» - відбувається зупинка її роботи. При натисканні на кнопку «Аварійна зупинка» (кнопка з фіксацією) відбувається знеструмлення кола керування автоматизованою системою.

Автоматизована система керування водопостачанням може забезпечувати роботу у трьох режимах:

- ✓ режим «Робочий»;
- ✓ режим «Швидке відкачування»;
- ✓ режим «Аварійне відкачування».

У робочому звичайному режимі роботи автоматизованої системи керування водопостачанням з датчиків верхнього та нижнього рівнів сигнал не надходить. Двигуни насосів працюють по черзі з частотою 0,1 Гц (тобто, з інтервалом 10 с.). Робота двигунів призупиняється при отриманні сигналу з датчика нижнього рівня. При отриманні сигналу з датчика верхнього рівня відбувається перехід системи у режим «Швидке відкачування». При зникненні того або іншого сигналів, система знову повертається у звичайний робочий режим роботи.

У режимі «Швидке відкачування» двигуни насосів працюють з інтервалом 0,2 Гц (інтервалом 5 с.). Вмикання двигунів відбувається парами: спочатку перший та другий двигуни насосів, потім перший та

третій, далі другий та третій і т.д. циклічно. При зникненні сигналу з давача верхнього рівня автоматизована система управління водопостачанням переходить у звичайний робочий режим роботи.

Для активування режиму «Аварійне відкачування» слід натиснути кнопку «Аварійне відкачування». Всі три двигуни насосів незалежно від даних, що отримані від здавачів верхнього та нижнього рівнів, переходять у ввімкнений стан. При відпусканні кнопки «Аварійне відкачування» режим деактивується. Робота автоматизованої системи переходить у стан робочий або «Швидке відкачування» залежно від показів давачів верхнього та нижнього рівнів.

До складу автоматизованої системи керування водопостачанням входять велика кількість давачів. Вихід з ладу одного з них може спровокувати роботу системи у невірному режимі та призвести до катастрофічних наслідків. Тому контроль та діагностика справності цих елементів є досить важливим. Для підвищення функціональної безпеки системи в цілому запропоновано застосувати вид резервування давачів, який має назву дублювання. На рис. 3 наведено програмний код керування системою автоматизованого керування із підвищеною функціональною безпекою, що написаний із використанням мови FBD у програмному забезпеченні LOGO! Soft Comfort від компанії Siemens.

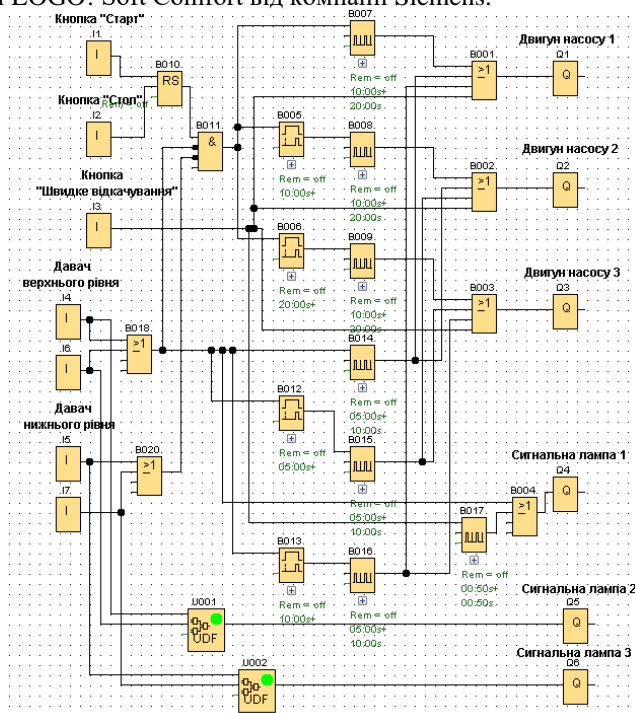


Рис. 3. Програмний код керування автоматизованою системою із підвищеною функціональною безпекою

У програмному коді використано наступні вхідні дані:

I1 – кнопка «Старт», при натисканні робота автоматизованої системи встановлюється у робочий звичайний режим;

I2 – кнопка «Стоп», відбувається зупинка роботи автоматизованої системи;

I3 – кнопка «Аварійне відкачування», відбувається перехід автоматизованої системи у режим аварійного відкачування, при якому працюють всі три насоси;

I4 – сигнал з давача верхнього рівня, перехід у режим «Швидке відкачування»;

I5 – сигнал з давача нижнього рівня, відбувається припинення роботи всіх насосів.

I6 – сигнал з резервованого давача верхнього рівня;

I7 – сигнал з резервованого давача нижнього рівня;

У програмному коді використано наступні вихідні дані:

Q1 – сигнал, що задає роботу двигуна першого насосу;

Q2 – сигнал, що задає роботу двигуна другого насосу;

Q3 – сигнал, що задає роботу двигуна третього насосу;

Q4 – сигнал, що задає роботу сигнальної лампи 1, миготіння якої може відбуватись у трьох режимах: лампа не світить – система знаходиться у звичайному штатному режимі роботи, лампа світить постійно – встановлений режим «Швидке відкачування», лампа світить періодично – встановлений режим «Аварійне відкачування».

Q5 – сигнал, що задає роботу сигнальної лампи 2, яка сповіщає про вихід з ладу одного з давачів верхнього рівня,

Q6 – сигнал, що задає роботу сигнальної лампи 3, яка сповіщає про вихід з ладу одного з давачів нижнього рівня.

Для фіксування натиснення/ненатиснення кнопок «Старт» або «Стоп» у запропонованому програмному коді використовується тригер, для ввімкнення/вимкнення автоматизованої станції.

Для можливості почергового вмикання/вимкання двигунів насосів використано блоки On-Delay (затримка ввімкнення) B005, B006 та Asynchronous Pulse Generator (генератор серії імпульсів) B007, B008 та B009. Затримка в блоці B005 встановлюється 10 с., в блоці B006 – 20 с., що дозволяє забезпечити затримку вмикання двигунів насосів та циклічність їх роботи у штатному режимі. Ці блоки впливають на час вмикання генераторів серії імпульсів B008 та B009 у звичайному штатному режимі роботи. Також для цих генераторів імпульсів встановлюються наступні параметри:

- ✓ interpulse width (тривалість інтервалу) – 20 сек.;
- ✓ pulse width (тривалість імпульсу) – 10 сек.

Від входу I3 до блоків 4-АБО натискання кнопки «Аварійне відкачування» відбувається запуск роботи всіх двигунів трьох насосів незалежно від показів давачів верхнього та нижнього рівнів. Відпускання кнопки, тобто на виході I3 встановлюється значення логічного «0», призводить до переходу у звичайний робочий режим роботи, або режим «Швидке відкачування».

Для переходу у режим «Швидке відкачування» встановлюються зв'язок із I4, тобто від давача верхнього рівня, зв'язок із I5 встановлюється для забезпечення вимкнення двигунів насосів при нижньому рівні води у резервуарі.

Використання блоків On-Delay (затримка ввімкнення) B012, B013 та Asynchronous Pulse Generator (генератор серії імпульсів) B014, B015 та B016 задається реалізація режиму «Швидке відкачування», тобто циклічна робота пар двигунів насосів з інтервалом 5 сек. При зникненні сигналу з давача верхнього рівня робота автоматизованої системи керування водопостачанням переходить у звичайний робочий режим.

Для блоку On-Delay B012 встановлюються затримка ввімкнення 5 сек., для B013 – 10 сек. Таким чином ввімкнення генераторів Asynchronous Pulse Generator B015 та B015 відбувається з затримкою і забезпечується циклічна робота двигунів насосів у режимі «Швидке відкачування», при цьому сигнальна лампа 1 блимає з частотою 1 Гц.

Часові параметри для B014, B015, B016 встановлюються наступним чином:

- ✓ interpulse width (тривалість інтервалу) – 10 сек.;
- ✓ pulse width (тривалість імпульсу) – 5 сек.

Для встановлення роботи сигнальної лампочки 1 у режимі миготіння додається до схеми Asynchronous Pulse Generator B017, у властивостях якого задаємо часові параметри:

- ✓ interpulse width (тривалість інтервалу) – 0,5 сек.;
- ✓ pulse width (тривалість імпульсу) – 0,5 сек.

Додатково обробляються сигнали I6 та I7, які надходять з резервованих (дубльованих) давачів верхнього та нижнього рівнів відповідно. Логіка роботи такої системи із врахуванням сигналів від дубльованих давачів верхнього рівня наведена у таблиці 1.

Згідно з даними таблиці 1 можна зробити наступний висновок про роботу системи. Якщо на входах I4 та I6 однакові значення, то на виході логічного елемента OR (B018) встановиться значення логічного «0» при значеннях I4, I6, що дорівнюють «0», або логічної «1» при значеннях I4, I6, що дорівнюють «1». Якщо значення на виходах давачів відрізняються, тобто на виході одного з них встановлюється значення логічної «1», а на іншому – логічного «0», то вважається, що один із давачів є несправним, але робота автоматизованої системи керування водопостачанням не зупиняється.

Таблиця 1
Таблиця істинності для прийняття рішення про
спрацювання давача верхнього рівня

I4	I6	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Для можливості контролю та діагностики стану давачів у програмний код потрібно додати відповідний функціональний блок. Частина програмного коду виконана із застосуванням UDF у LOGO! Soft Comfort, його зображення наведено на рис. 4.

Логіка роботи наведеного функціонального блоку наведена у таблиці 2.

Згідно з даними, що наведені у таблиці 2, можна зробити висновок, що сигнал логічної «1» на виході цього блоку з'явиться лише у випадку різних значень на виходах дубльованих давачів верхнього рівня, тобто при несправності обох давачів верхнього рівня, і в цьому випадку

оператору надходить повідомлення – сигнальна лампа 2 засвітиться. Оператор, отримавши це повідомлення, приймає рішення про заміну одного з давачів.

Аналогічним чином відбувається дублювання датчика нижнього рівня. До сигналу I5 додатково вводить сигнал з дубльованого датчика I7, а повідомлення про несправність датчика нижнього рівня надходить оператору у вигляді світіння сигнальної лампочки 3.

Таблиця 2

Таблиця істинності роботи блоку діагностики справності датчика верхнього рівня

I4	I6	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

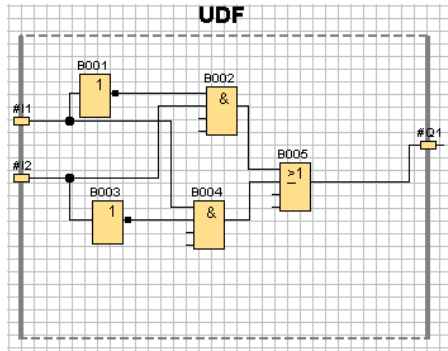


Рис. 4. Програмний код функціонального блоку діагностики справності резервованих датчиків

На рис. 5 наведено структурно-функціональну схему контуру.

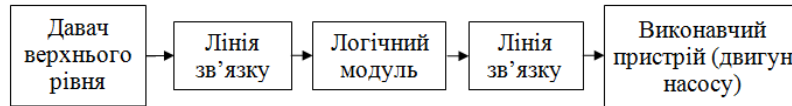


Рис. 5. Структурно-функціональна схема контуру контролю верхнього рівня води

Із використанням закону експоненційного розподілу часу здійснено оцінку ймовірності безвідмовної роботи елементів контуру за формулою (1) [6]:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (1)$$

де λ_i – інтенсивність відмов, год⁻¹, t – час напрацювання, год.

Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи послідовно-організованої контуру здійснюється за формулою (2):

$$P_k(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = P_d \cdot P_{ЛЗ} \cdot P_{ЛМ} \cdot P_{ЛЗ} \cdot P_{ВП}, \quad (2)$$

де $P_k(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи контуру; P_d – ймовірність безвідмовної роботи датчика; $P_{ЛЗ}$ – ймовірність безвідмовної роботи лінії зв'язку; $P_{ЛМ}$ – ймовірність безвідмовної роботи логічного модуля; $P_{ВП}$ – ймовірність безвідмовної роботи виконавчого пристрою.

Згідно (4.1) визначимо ймовірність безвідмовної роботи елементів контуру за час напрацювання 2000 год. Ймовірність безвідмовної роботи датчика:

$$P_d = e^{-2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 0,9896.$$

Ймовірність безвідмовної роботи лінії зв'язку:

$$P_{ЛЗ} = e^{-10^{-5} \cdot 2000} = 0,9608.$$

Ймовірність безвідмовної роботи логічного модуля:

$$P_{ЛМ} = e^{-0,3 \cdot 10^{-8} \cdot 2000} = 0,9988.$$

Ймовірність безвідмовної роботи виконавчого пристрою:

$$P_{ВП} = e^{-8,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 0,9662.$$

Згідно (2) ймовірність безвідмовної роботи контуру становитиме:

$$P_k(2000) = 0,9948 \cdot 0,9802 \cdot 0,9994 \cdot 0,9802 \cdot 0,983 = 0,9389.$$

Отримане значення є досить низьким, що свідчить про недостатню надійність контуру контролю рівня води у резервуарі. Це значення можливо збільшити при резервуванні елементів контуру.

При резервуванні елементів ймовірність безвідмовної роботи контуру визначається за виразом (3) [3]:

$$P_{i,рез}(t) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i(t)), \quad (3)$$

де k – кількість повторів елементів при резервуванні.

Проведемо оцінку надійності при резервуванні датчиків рівня. На рис. 6 наведено структурно-функціональну схему контуру контролю верхнього рівня води із резервуванням датчиків.

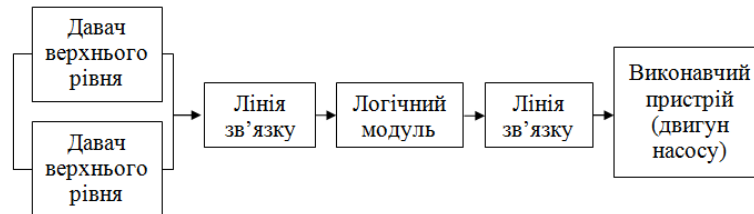


Рис. 6. Структурно-функціональна схема контуру контролю верхнього рівня води із резервуванням датчиків

Згідно (3) ймовірність безвідмовної роботи резервованих датчиків становитиме:

$$P_{д,рез}(2000) = 1 - (1 - 0,9896) \cdot (1 - 0,9896) = 0,9999.$$

А ймовірність безвідмовної роботи контуру $P_{к1}(t)$ при резервуванні датчиків за (2) набуде значення:

$$P_{к1}(2000) = 0,9999 \cdot 0,9802 \cdot 0,9994 \cdot 0,9802 \cdot 0,983 = 0,9438.$$

При порівнянні отриманих значень $P_k(t)$ та $P_{к1}(t)$ встановлено, що резервування дало можливість підвищити ймовірність безвідмовної роботи контуру, але це значення все одно є замалим.

З метою підвищення ймовірності безвідмовної роботи контуру здійснюється резервування ліній зв'язку. На рис. 7 наведено структурно-функціональну схему контуру контролю верхнього рівня води із резервуванням датчиків та ліній зв'язку.

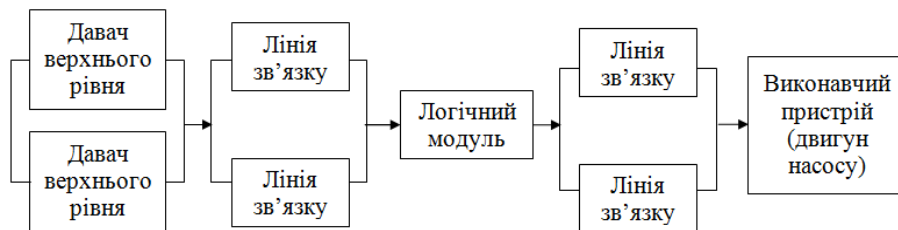


Рис. 7. Структурно-функціональна схема контуру контролю верхнього рівня води із резервуванням датчиків та ліній зв'язку

Згідно (3) ймовірність безвідмовної роботи резервованих ліній зв'язку становитиме:

$$P_{ЛЗ,рез}(2000) = 1 - (1 - 0,9802) \cdot (1 - 0,9802) = 0,9996.$$

А ймовірність безвідмовної роботи контуру $P_{к2}(t)$ при резервуванні датчиків та ліній зв'язку за (2) набуде значення:

$$P_{к2}(2000) = 0,9999 \cdot 0,9996 \cdot 0,9994 \cdot 0,9996 \cdot 0,983 = 0,9816.$$

Аналогічним чином потрібно провести резервування ще одного контуру контролю води – нижнього рівня.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У результаті проведених розрахунків показано, що резервування давачів та ліній зв'язку дає можливість значно підвищити ймовірність безвідмовної роботи контуру контролю рівня води на 0,0427 до значення 0,9816, а отже автоматизованої системи керування водопостачанням в цілому.

Література

1. Березуцький В.В., Адаменко М.І. Небезпечні виробничі ризики та надійність: навчальний посібник. Харків. : ФОП Панов А. М., 2016. 385 с.
2. Фесенко Г. В. Потенційно небезпечні виробничі технології та їх ідентифікація : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 95 с.
3. Карташов В.В. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : посібник з лекцій. Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017. 149 с.
4. IEC 61508. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2010.
5. IEC 61511. Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2003.
6. Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 160 с.

References

1. Berezutskyi V.V., Adamenko M.I. Nebezpechni vyrobnychi ryzyky ta nadiinist: navchalnyi posibnyk. Kharkiv. : FOP Panov A. M., 2016. 385 s.
2. Fesenko H. V. Potentsiino nebezpechni vyrobnychi tekhnolohii ta yikh identyfikatsiia : konspekt leksii. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2018. 95 s.
3. Kartashov V.V. Avtomatyzovani systemy keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy : posibnyk z leksii. Ternopil : Vyd-vo TNTU im. I. Puliua, 2017. 149 s.
4. IEC 61508. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2010.
5. IEC 61511. Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2003.
6. Vasilevskyi O. M., Ihnatenko O. H. Normuvannia pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv : navchalnyi posibnyk. Vinnytsia : VNTU, 2013. 160 s.