

Макаренко В.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савченко Ю.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТРУКТУРНОЇ НАДЛИШКОВОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ АНАЛОГОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

У статті наведені результати дослідження шляхів побудови надійних систем обробки аналогових сигналів з використанням елементів невисокої надійності. Проведений порівняльний аналіз методів побудови надійних систем з використанням резервування окремих елементів систем за різними алгоритмами.

Запропоновано виявляти несправність в одному з каналів системи з резервуванням шляхом порівняння огинаючої цих сигналів. Інші методи виявлення різниці у сигналах резервних та основного каналів обробки аналогової інформації або потребують дуже значних апаратних та обчислювальних витрат, що призводить до подорожчання системи та зниження її надійності, або не дозволяють достовірно встановити цю різницю. Це пояснюється тим, що завжди існує розбіжність амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик вузлів, виконаних по однакових схемах.

Показано, які труднощі виникають при виявленні непрацездатної ланки системи аналогової обробки інформації на ранній стадії, що пов'язано з необхідністю виділення огинаючої аналогового сигналу. При виділенні огинаючої використовуються фільтри нижніх частот для послаблення складників сигналу, що призводить до інерційності системи виявлення несправності. Показано, яким чином можна виділити огинаючу сигналу довільної форми без використання фільтрів нижніх частот.

Запропоновано дві структури систем із резервуванням: одна – з повною обробкою сигналів у кожному з основних і резервного каналів, інша – з обробкою сигналу на виході всієї системи резервування. Наведена модель для дослідження властивостей системи резервування для обробки аналогової інформації. Результати моделювання підтвердили раціональність підходу з точки зору спрощення системи виявлення несправностей і управління резервними каналами. На основі проведених досліджень сформульовані висновки.

Ключові слова: надійність, резервування, відмовостійкість, огинаюча, детектор, моделювання, Multisim.

Постановка проблеми. Методи забезпечення відмовостійкості з використанням резервування очевидні з точки зору підтвердження досягнутого рівня відмовостійкості. Цим і пояснюється їх широке застосування при створенні сучасних відмовостійких комп'ютерів і комп'ютерних систем. Однак застосування подібних методів для підвищення надійності аналогових систем обробки інформації не висвітлені в літературі і інших публікаціях з проблем надійності. В той же час використовуються системи як з аналоговою, так і цифровою обробкою сигналів. Тому пошук прийнятних методів підвищення надійності аналогових систем є важливим завданням інжинірингу при створенні надійних систем із ненадійних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі методи введення структурної надлишковості [1, 2] виникли та широко застосовуються здебільшого для створення високонадійної цифрової апаратури у випадках, коли її обслуговування (ремонт і відновлення компонентів є проблематичним або за умов експлуатації взагалі виявляється неможливим). В цьому випадку процедури (алгоритми) відновлення сигналів є досить простими та легко можуть бути реалізовані апаратно або програмно, навіть коли компонентами структури є комп'ютери або інші досить складні цифрові пристрої. Загалом різноманіття таких алгоритмів, які натеper застосовуються практично, зовсім невелике і за рівнем популярності може бути обмежене двома процедурами,

які підтримуються зокрема апаратурою фірми Tandem [3].

Мабуть, перше місце за розповсюдженням слід віддати вже класичним мажоритарним структурам (лінія Integrity). В цьому випадку один компонент структури замінюється трьома компонентами (Рис. 1а), а вихідні сигнали компонентів подаються на так званий відновлюючий орган (ВО), який утворює вихідний сигнал структури як результат «голосування» входів за правилом простої більшості. Така організація структури за рахунок 3-кратної надлишковості дозволяє зберегти працездатність структури при відмові будь-якого з трьох компонентів і з цієї точки зору є відмовостійкою.

Відновлюючий орган у структурі лінії Integrity для однобітових сигналів виконує так звану мажоритарну логічну функцію:

$$y = x_1 \# x_2 \# x_3 = x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3,$$

де символи x_1, x_2, x_3 y – двійкові сигнали, які приймають значення 0 або 1.

Структура лінії Tandem NonStop передбачає 4-кратну надлишковість (Рис. 1б), а обробка сигналів відбувається одночасно двома «парами». При неспівпадінні значень сигналів в одній із пар відповідна пара миттєво відключається від утворення результату на виході структури. При застосуванні методу в цифровій апаратурі, наприклад для однобітових сигналів, реалізація процедури відновлення не викликає проблем і може (як один із варіантів) бути реалізована теж мажоритарною функцією:

$$y = x_1 \# x_2 \# x_3 \# x_4 = x_1x_2x_3 + x_1x_2x_4 + x_1x_3x_4 + x_2x_3x_4.$$

Така спрощена функція відновлення в явному вигляді не враховує вимогу «миттєвого відключення» пари з неспівпадаючими сигналами. Реалізація цієї вимоги не завжди є простою і залежить від подальшого використання вихідних сигналів структури. Наприклад, коли йдеться про керуючі сигнали, які надходять на реальні фізичні об'єкти, то участь сигналів від пари з неспівпадаючими сигналами має бути надійно заблокована.

Постановка завдання. Метою досліджень є пошук технічних рішень для створення сучасних відмовостійких систем обробки аналогової інформації.

Матеріал і результати досліджень. Структурна надлишковість може бути введена на таких рівнях організації системи:

- на рівні елементів;
- на рівні функціональних блоків;
- на рівні підсистем.

Перспективним є введення структурної надлишковості на рівні функціональних блоків. Принцип побудови системи з такою надлишковістю зводиться до такого:

- система розбивається на функціональні блоки;
- надлишковість розподіляється між блоками;
- кожний блок будується по мажоритарному принципу – у вигляді непарного числа паралельних однотипних гілок, виходи яких подаються на відновлюючий орган, який приймає рішення за правилом більшості.

ВО перешкоджає проходженню сигналів з помилками в наступні блоки шляхом підключення іншої паралельної гілки до виходу замість тієї, в якій виникли помилки. Розподіл надлишковості повинен бути таким, щоб забезпечувалася однакова надійність усіх резервованих блоків. Такий вид резервування належить до роздільного при постійно включеному резерві [2].

Автори розглядають, як подібні структури можуть бути використані у випадках відновлення аналогових, а не цифрових (двійкових) сигналів. Зрозуміло, що насамперед необхідно визначити власне функції, які виконують відновлюючі органи, та способи їх реалізації.

Необхідно також звернути увагу на принципову відмінність між цифровими (двійковими) та аналоговими сигналами. У випадку мінімально можливого рівня резервування, коли один пристрій (схема) замінюється двома пристроями, коли сигнали на їх виходах стають різними, цей факт легко виявити та зафіксувати. Але коли це двійкові сигнали 0 та 1 або 1 та 0, не існує способу визначити, який з них правильний, а який – хибний. Тому про

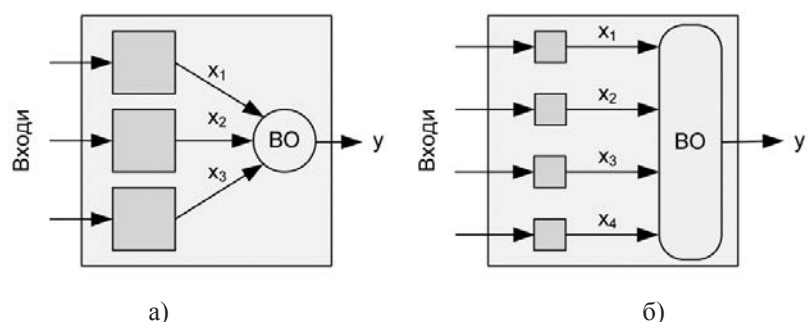


Рис. 1. Класичні мажоритарні структури лінія Integrity (а) та лінія Tandem NonStop (б)

відновлення правильного сигналу не може бути й мови, і 2-кратна надлишковість застосовується лише як засіб функціонального контролю технічного стану обладнання та підвищення достовірності результатів обробки сигналів. Саме тому рівень 2-кратної надлишковості для забезпечення відмовостійкості не розглядається.

Інша справа – аналогові сигнали. Виявити «неправильний» сигнал, який свідчить про несправність відповідної схеми, для аналогових сигналів здебільшого можна на основі аналізу їх фізичних параметрів. Тобто при мінімально можливому рівні надлишковості (2-кратному) вже можливо визначити, який із двох пристроїв формує хибний сигнал.

Слід зазначити, що основною проблемою при побудові систем відновлення аналогових сигналів є виявлення зникнення (пропаданя) аналогового сигналу в каналі його обробки для включення резервного каналу. За основу в якості критерію можна прийняти миттєве значення огибаючої аналогового сигналу. Такий критерій дозволить з великою вірогідністю виявити зникнення модульованих аналогових сигналів з амплітудною (АМ), частотною (ЧМ) чи фазовою (ФМ) модуляцією.

Однак для немодульованих аналогових сигналів ця задача ускладнюється тим, що в сигналі можуть бути паузи, тобто коли рівень сигналу знижується до рівня шуму. У випадку таких сигналів потрібно вводити інерційний елемент, який дозволить залишати в роботі основний канал обробки сигналів, а не перемикає його на резервний при зменшенні рівня сигналу нижче заданого порогового значення. В цьому випадку ситуація стає ще складнішою, бо треба знати характер аналогового сигналу. Наприклад, мовний і музичний сигнали значно відрізняються не тільки спектральним складом, а й динамікою зміни огибаючої цих сигналів. Навіть для різних жанрів музики будуть спостерігатися значні відмінності. Якщо це сигнали, які надходять від сенсорів, то в них буде зовсім інша динаміка зміни огибаючої.

Автори розглядають найбільш простий з точки зору «пропаданя» випадок сигналу з частотною модуляцією. Для реалізації системи резервування такого сигналу можна спробувати використати структуру лінії Integrity. На Рис. 2 наведена спрощена структура системи резервування ЧМ-сигналів. Система складається з трьох ідентичних блоків обробки аналогових сигналів БО1-БО3, трьох аналогових ключів S1-S3 та блока формування сигналів управління z1-z3.

В кожному з каналів обробки з аналогового сигналу виділяється огибаюча за допомогою детекторів огибаючої ДО1-ДО3. Напряга, сформована на виході детекторів огибаючої, попарно порівнюється між собою за допомогою диференційних підсилювачів ДП1-ДП3. Підсилена різниця напруги сигналів $U_{П1}-U_{П3}$ надходить на входи трьох компараторів К1-К3. Схема управління на основі значення змінних $x1-x3$ на виходах компараторів формує сигнали управління аналоговими ключами S1-S3. Якщо сигнали в кожному з каналів ідентичні, то змінна $z1$ приймає значення логічної «1» і замикається ключ S1. На вихід надходить сигнал з виходу БО1, тобто U_1 .

Автори розглядають найбільш простий з точки зору «пропаданя» випадок сигналу з частотною модуляцією. Для реалізації системи резервування такого сигналу можна спробувати використати структуру лінії Integrity. На Рис. 2 наведена спрощена структура системи резервування ЧМ-сигналів. Система складається з трьох ідентичних блоків обробки аналогових сигналів БО1-БО3, трьох аналогових ключів S1-S3 та блока формування сигналів управління $z1-z3$.

В кожному з каналів обробки з аналогового сигналу виділяється огибаюча за допомогою детекторів огибаючої ДО1-ДО3. Напряга, сформована на виході детекторів огибаючої, попарно порівнюється між собою за допомогою диференційних підсилювачів ДП1-ДП3. Підсилена різниця напруги сигналів $U_{П1}-U_{П3}$ надходить на входи трьох компараторів К1-К3. Схема управління на основі значення змінних $x1-x3$ на виходах компараторів формує сигнали управління аналоговими ключами S1-S3. Якщо сигнали в кожному з каналів ідентичні, то змінна $z1$ приймає значення логічної «1» і замикається ключ S1. На вихід надходить сигнал з виходу БО1, тобто U_1 .

Автори розглядають різні випадки співвідношення рівнів сигналів в різних каналах. Перший випадок. Сигнал у першому каналі обробки зменшився за амплітудою або відсутній. Тоді $U_1 < U_2$ і одночасно $U_1 < U_3$. Напряга на виході детекторів огибаючої $U_{Д1} < U_{Д2}$ і $U_{Д1} < U_{Д3}$. Диференційні підсилювачі порівнюють напругу з виходів детекторів огибаючої. За умови, що $U_{Д1} \approx U_{Д2} \approx U_{Д3}$ значення напруги на виході підсилювачів ДП1-ДП3 буде незначним (залежить від коефіцієнта підсилення ДП). Напряга з виходу кожного ДП порівнюється за допомогою компараторів К1-К3 з опорною напругою $U_{ОП1}$, яка формується джерелом опорної напруги (ДОН1).

Для прикладу, який розглядається, різниця $U_{д2} - U_{д1}$ стане більшою ніж $U_{оп1}$ і на виході першого компаратора буде сформована змінна $x_1 = 1$. Аналогічне значення прийме і змінна x_3 . Оскільки $U_{д2} \approx U_{д3}$, то $x_2 = x_4 = 0$. Інші випадки аналізуються аналогічно. Схема управління повинна формувати значення змінних так, як показано в Табл. 1.

На основі даних Табл. 1 можна скласти рівняння для змінних управління ключами спрощеної схеми (без урахування випадку $U_c < U_{оп2}$). Вони приймають такі значення:

$$\begin{aligned} z_{1c} &= \overline{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}, \\ z_{2c} &= \overline{x_1 + x_2 + \overline{x_3 + x_4}}, \\ z_{3c} &= \overline{x_1 + x_2 + \overline{x_3 + \overline{x_4}}}. \end{aligned}$$

Випадок, коли напруга на виході суматора (Σ) стає нижчою за значення напруги на виході другого джерела опорної напруги $U_{оп2}$, відповідає аварійному стану, тобто сигнали в усіх каналах є

нижчими визначеного рівня. Від виходу відключаються всі канали обробки сигналів. Сигнали управління ключами блокуються за допомогою логічних елементів І, на входи яких подається блокуючий сигнал логічного «0», що формується на виході компаратора К5, як показано на Рис. 3.

З урахуванням випадку, коли $U_c < U_{оп2}$, вирази для змінних управління будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} z_1 &= x_5 (\overline{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}), \\ z_2 &= x_5 (\overline{x_1 + x_2 + \overline{x_3 + x_4}}), \\ z_3 &= x_5 (\overline{x_1 + x_2 + \overline{x_3 + \overline{x_4}}}). \end{aligned}$$

Значенням вихідного сигналу відповідають рівнянням:

$$U_{вих} = z_1 U_1 + z_2 U_2 + z_3 U_3$$

Повна функціональна схема системи резервування, яка наведена на Рис. 3, реалізує рівняння,

Таблиця 1

Таблиця відповідності сигналів управління ключами наявності сигналів в каналах обробки

Змінні	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	z_1	z_2	z_3
$U_1 = U_2 = U_3, U_c > U_{оп2}$	0	0	0	0	1	1	0	0
$U_1 < U_2, U_1 < U_3, U_c > U_{оп2}$	0	1	1	0	1	0	1	0
$U_1 < U_3, U_2 < U_3, U_c > U_{оп2}$	0	0	1	1	1	0	0	0
$U_c < U_{оп2}$	*	*	*	*	0	0	0	0

* змінна приймає будь-яке значення

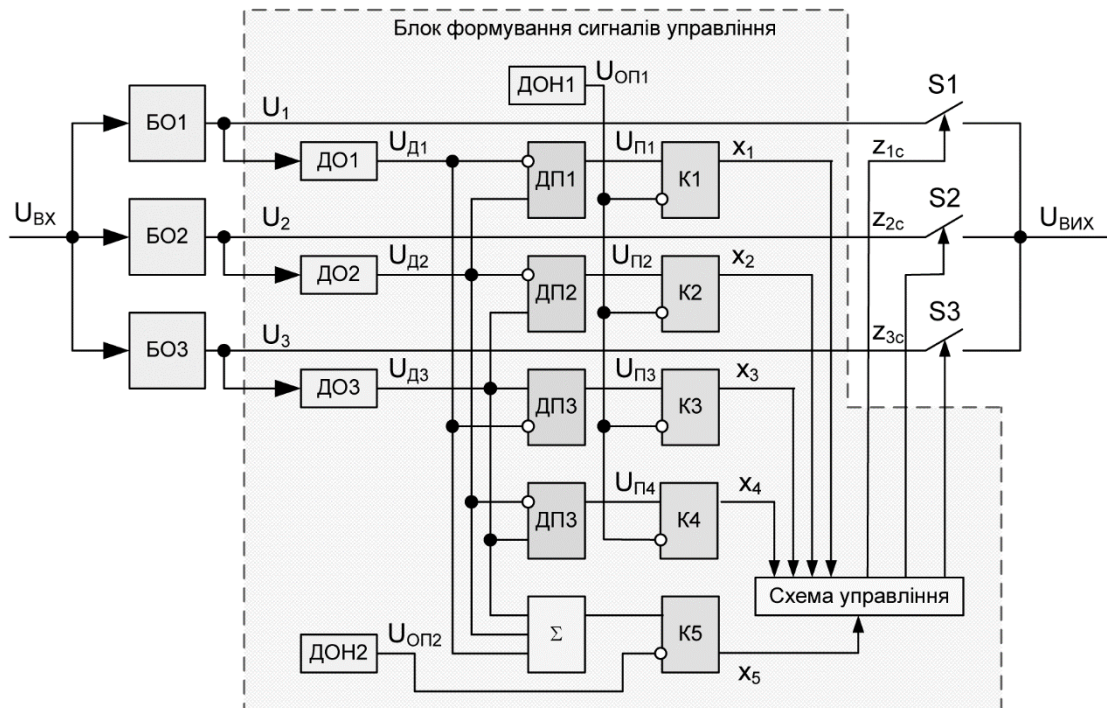


Рис. 2. Спрощена функціональна схема системи резервування ЧМ-сигналі

що описує $U_{\text{вих}}$. Наведена функціональна схема хоч і дозволяє здійснювати резервування аналогових сигналів, але є досить складною і містить значну кількість компонентів. Найбільш складним вузлом такої системи є детектор огинаючої навіть для найбільш простого випадку резервування модульованих сигналів.

Варіант спрощеної функціональної схеми 4-кратного резервування з одним каналом детектування несправності наведений на Рис. 4.

Блоки обробки аналогових сигналів підключаються до виходу системи за допомогою аналогового мультиплексора (AMS). Управляється AMS дворозрядним кодом, який знімається з виходів двійкового лічильника СТ2. При включенні живлення на виході схеми початкового встановлення (СПВ) формується короткий імпульс, що встановлює лічильник СТ2 у початковий стан. Тобто сигнали на його виходах Q0 та Q1 дорівнюють

«0», а AMS під'єднає до виходу системи вихід БО1. Вихідний сигнал AMS подається на детектор огинаючої (ДО), вихід якого під'єднаний до інвертуючого входу диференційного підсилювача. На неінвертуючий вхід ДП подається напруга $U_{\text{оп1}}$ з виходу ДОН1. Якщо перший канал обробки сигналів БО1 справний, то напруга на виході ДП перевищує напругу $U_{\text{оп2}}$, яка формується джерелом опорної напруги ДОН2, а на виході компаратора К формується логічна «1».

Як тільки напруга на виході AMS впаде нижче заданого $U_{\text{оп1}}$ рівня, напруга на виході ДП стане меншою ніж $U_{\text{оп2}}$, а на виході компаратора буде сформовано рівень логічного «0». Це призведе до перемикавання лічильника у стан 01 і підключення до виходу сигналу БО2. Час перемикавання залежить від швидкодії детектора огинаючої, зумовленої наявністю в його складі фільтра нижніх частот (ФНЧ).

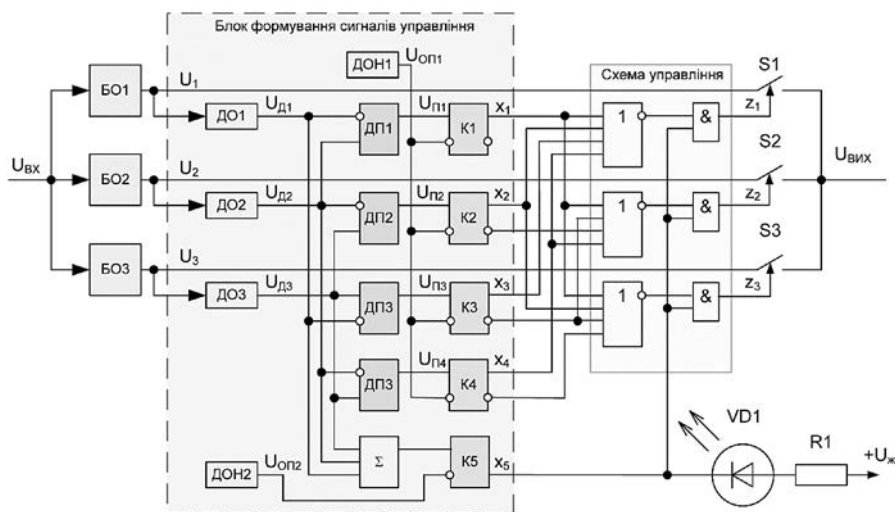


Рис. 3. Повна функціональна схема системи резервування

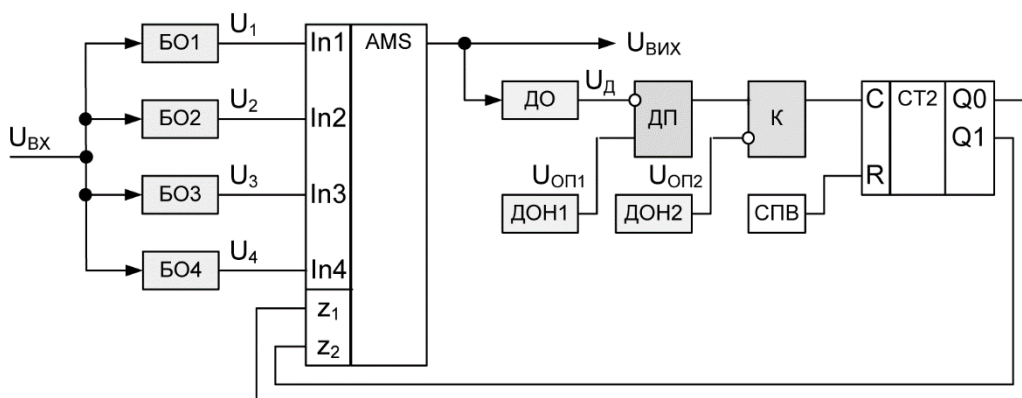


Рис. 4. Спрощена функціональна схема резервування з одним каналом детектування несправності

Вихідна напруга може бути описана рівнянням:

$$U_{вих} = \bar{z}_1 \bar{z}_2 U_1 + z_1 \bar{z}_2 U_2 + \bar{z}_1 z_2 U_3 + z_1 z_2 U_4.$$

Для підвищення швидкодії можна використати для виділення огинаючої будь-якого аналогового сигналу перетворювач Гільберта, алгоритм роботи якого відповідає формулі:

$$U_d = \sqrt{U_c^2 + \hat{U}_c^2},$$

де U_d – напруга на виході перетворювача Гільберта, U_c – напруга на вході перетворювача, \hat{U}_c – спряжена за Гільбертом вхідна напруга.

Щоб сформувати спряжену за Гільбертом напругу, необхідно пропустити вхідний сигнал через широкосмуговий фазообертач сигналу на 90° , що є досить складною задачею. Тому такий підхід вимагає реалізації складного фазообертача. Для перевірки працездатності системи резервування, наведеної на Рис. 4, автори провели імітаційне моделювання такої системи за допомогою spice-симулятора NI Multisim. Модель для дослідження наведена на Рис. 5.

В якості блоків обробки аналогових сигналів використовується чотири операційних підсилювачі U1A-U1D, виходи яких під'єднані до входів аналогового комутатора S1 (ADG409BR). Детектор огинаючої складається з детектора середньоквадратичних значень сигналу U4 (AD737AN) та конденсатора C1, який утворює з внутрішнім опором детектора ФНЧ. Вихідний сигнал детектора огинаючої порівнюється з напругою, яка формується дільником R7, R11 за допомогою операційного під-

силювача U2. Компаратор U8 порівнює вихідну напругу U2 з напругою $U_{оп2}$, яка формується за допомогою дільника R12, R10. Потенціометр R10 дає можливість змінювати чутливість системи до рівня сигналу на виході детектора огинаючої.

Вихідний сигнал компаратора подається на вхід двійкового лічильника U3. Для встановлення лічильника в початковий стан при початку симуляції використовується дільник напруги R5, R6, конденсатор C2 та інвертор U5. При включенні живлення починається заряджання конденсатора C2 через резистор R5. Поки напруга на його обкладинках буде меншою за 2.5 В, на виході U5 буде сформована логічна «1» і лічильник буде встановлений у «0». Після того, як напруга на C2 сягне 2.5 В, на виході U5 формується логічний «0», що дозволяє лічильнику працювати. Значення коду на виході лічильника контролюється за допомогою індикаторів X1 та X2. Індикатор світиться при значенні сигналу, що дорівнює логічному «1».

Імітація пропадання сигналу в каналі обробки здійснюється за допомогою перемикачів S2-S5. Коли перемикач розімкнений, аналоговий сигнал проходить на його вихід. При замиканні перемикача сигнал на вході відповідного підсилювача дорівнює нулю, що сприймається системою як несправність. Результати випробувань роботи системи за допомогою 4-канального осцилографа наведені на Рис. 6.

На Рис. 6 верхня діаграма відповідає сигналу на виході системи резервування, друга зверху – сигналу на виході детектора огинаючої, третя зверху – сигналу на виході підсилювача U2, а нижня – сигналу на виході компаратора.

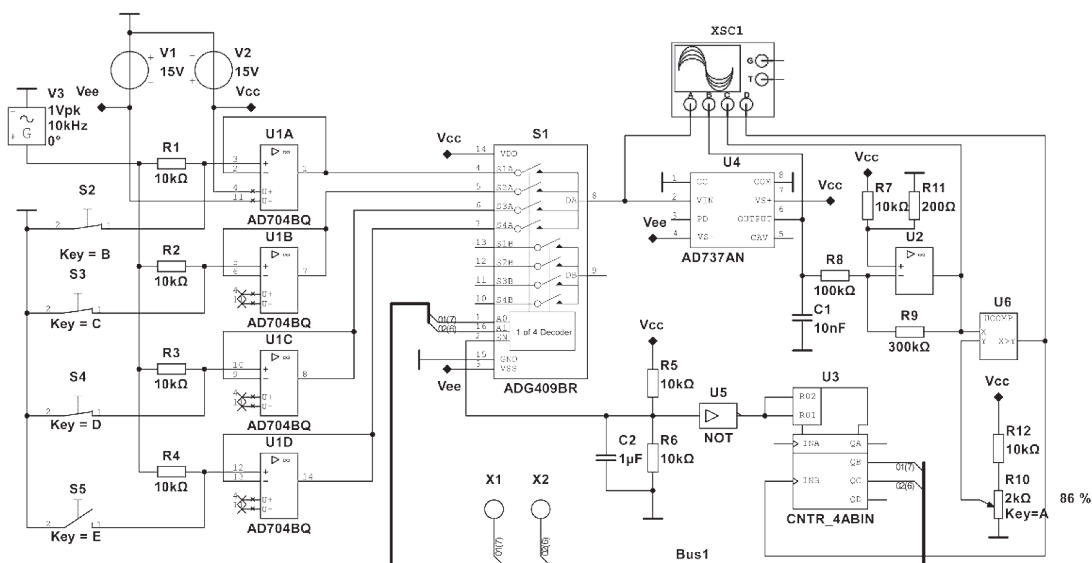


Рис. 5. Модель для дослідження системи з 4-кратним резервуванням

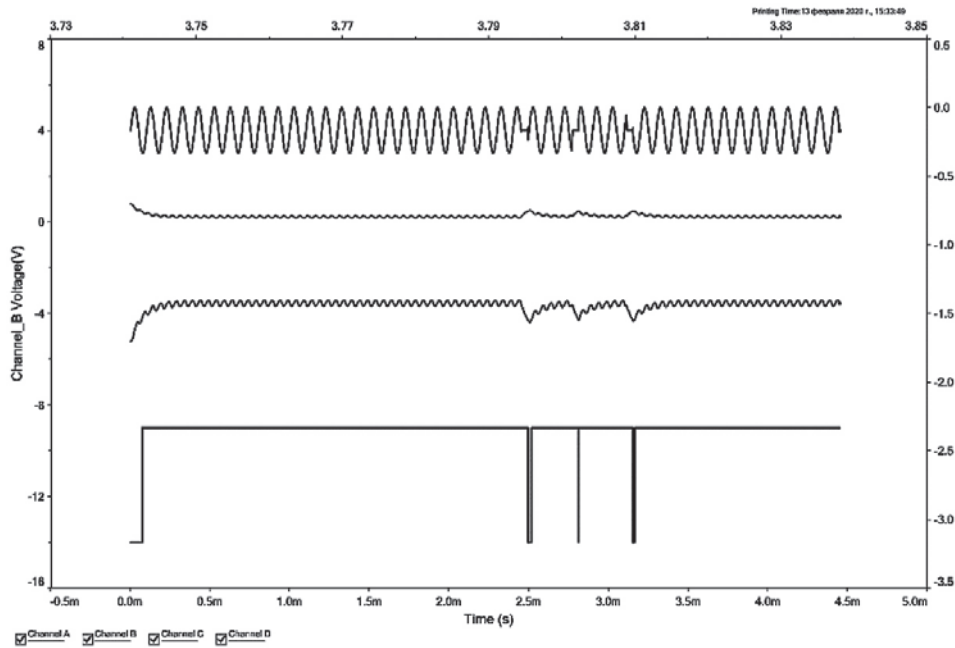


Рис. 6. Результати випробувань системи резервування

Експеримент проводився таким чином. Спочатку всі перемикачі S2-S5 були розімкнуті. На верхній діаграмі (Рис. 6) видно, що сигнал на виході має синусоїдальну форму (початкову ділянку діаграм не слід розглядати, бо вона відповідає перехідному процесу). Після замикавання перемикача S2 сигнал на виході системи спадає до нуля і напруга на виході підсилювача U2 починає спадати. Якщо порівнювати між собою діаграми сигналів на виходах U2 та компаратора, то бачимо, що коли вихідний сигнал спадає за рівнем до порогового рівня спрацьовування компаратора, на виході компаратора формується імпульс, який подається на вхід лічильника. Лічильник змінює код на виході, і аналоговий мультиплексор підключає вихід другого каналу обробки сигналу до виходу системи. На верхній діаграмі видно, що після появи першого з імпульсів на виході компаратора сигнал на виході системи відновлюється.

Аналогічно відключалися сигнали другого та третього каналів обробки, що призводило до перемикавання мультиплексора і підключення на вихід сигналу наступного каналу, що ілюструють діаграми на Рис. 6. Сигнал на виході системи зберігається, доки працездатний хоч один із підсилювачів. Викривлення форми сигналу в момент перемикавання на вихід працездатного каналу пов'язано з інерційністю детектора огинаючої. При зменшенні інерційності тривалість перехід-

ного процесу зменшується і викривлення стануть менш помітними.

Висновки. Під час досліджень було проаналізовано методи підвищення надійності електронної апаратури і обрано для реалізації метод загального резервування вузлів із заміщенням. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Найскладнішою процедурою при побудові систем підвищеної надійності для обробки аналогових сигналів із резервуванням є виявлення факту відхилення параметрів каналу обробки сигналів від заданих або від параметрів резервних каналів.
2. Для виявлення факту відхилення сигналів в основному та резервному каналах доцільно виконувати порівняння огинаючої аналогових сигналів цих каналів.
3. Для виділення огинаючої аналогових сигналів необхідно використовувати детектори середньоквадратичних значень і фільтри нижніх частот.
4. Для підвищення швидкості перемикавання на резервні канали доцільно зменшувати постійні часу фільтрів нижніх частот.
5. При малих значеннях постійної часу фільтрів нижніх частот погіршується фільтрація низькочастотних складників сигналу, що погіршує точність виявлення відхилень сигналів від заданих значень.
6. Найефективнішим способом виділення огинаючої аналогових сигналів є використання перетворюю-

вача Гільберта. Однак таке рішення потребує реалізації складного ширококутового фазообертача.

Для більш точної оцінки потенційних можливостей систем резервування необхідно додатково

провести пошук оптимальної з точки зору швидкості перемикання системи на резервний канал смуги пропускання фільтру нижніх частот та вибору типу апроксимації його АЧХ.

Список літератури:

1. Острейковский В.А. Теория надежности : Учеб. для вузов / В.А. Острейковский. М. : Высш. шк., 2003. 463 с.
2. Надежность технических систем : Справочник. Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и другие. Под ред. И.А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 608 с.
3. А.В. Федухин, П.Д. Сеспедес Гарсия. К вопросу о структурах отказоустойчивых компьютеров фирмы Stratus Computer Inc. *Математичні машини і системи*. 2018, № 4, С. 87–100.

Makarenko V.V., Savchenko Y.G. FEATURES OF USE OF STRUCTURAL EXTRAORDINITY TO ENSURE THE RELIABILITY OF ANALOG ELECTRONIC EQUIPMENT

The article presents the results of the study of ways to build reliable analog signal processing systems using elements of low reliability. A comparative analysis of methods of building reliable systems using redundancy of individual system elements according to different algorithms is carried out.

It is proposed to identify a fault in one of the channels of the redundant system by comparing the envelope of these signals. Other methods of detecting the difference in the signals of the backup and main channels of processing analog information either require very large hardware and computing costs, which leads to a rise in price of the system and a decrease in its reliability, or will not allow to establish this difference reliably. This is explained by the fact that there is always a discrepancy between the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the nodes, made according to the same schemes.

It is shown what difficulties arise in the detection of an inoperative link of the analog information processing system at an early stage, which is connected with the necessity of allocation of an envelope analog signal. In the selection of the envelope, low-pass filters are used to attenuate the signal components, resulting in inertia of the fault detection system. It is shown how to select an envelope of arbitrary shape without the use of low pass filters. Two structures of redundant systems are proposed. One with full signal processing in each of the main and backup channels and the other with signal processing at the output of the entire backup system.

A model for investigating the properties of a redundancy system for processing analog information is presented. The simulation results confirmed the rationality of the approach in terms of simplifying the fault detection and backup channel management system. Based on the conducted research, conclusions are drawn.

Key words: reliability, redundancy, fault tolerance, envelope, detector, modeling, Multisim.