

УДК 004.312.466

doi: 10.32620/aktt.2022.6.08

О. О. ВДОВІЧЕНКО, А. Є. ПЕРЕПЕЛИЦИН, В. І. ДУЖИЙ, О. В. ЖЕЛТУХІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

МЕТОД ДИСТАНЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ, ПЕРЕПРОГРАМУВАННЯ І РЕКОНФІГУРАЦІЇ ВУЗЛІВ ВБУДОВАНОЇ СИСТЕМИ

Предметом вивчення в даній статті і дослідженні виступає метод для дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації окремих складових вузлів вбудованих та малогабаритних систем. **Метою** роботи є підвищення характеристик надійності систем, побудованих на базі мікропроцесорних рішень. **Завдання:** розглянути існуючі методи комунікації набору мікроконтролерів (МК) у системі з можливістю уточнення вимог; розглянути і проаналізувати існуючі технології і засоби дистанційного перепрограмування окремих МК у складі цільової системи; розглянути способи додавання надмірності в схему підключення МК для можливості реконфігурації; описати елементи методу і послідовність розроблення систем, які передбачають можливість дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації їх окремих вузлів. Відповідно до поставлених завдань, були отримані наступні **результати**. Проаналізовані існуючі методи і засоби для комунікації набору МК. Проаналізовані можливі технічні рішення і теоретичні основи для внутрішньосистемного перепрограмування вузлів системи на базі МК. Проведено аналіз однієї із доступних індустриальних технологій з метою винайдення властивостей, які дозволять розширити можливості створюваних систем в частині підвищення надійності і енергоефективності. Запропоновано використовувати модифікований bootloader для організації можливості комунікації і перепрограмування по одній лінії зв'язку. Запропоновано набір кроків для пошуку варіантів побудови схеми з апаратною надлишковістю. **Висновки.** Запропоновано послідовність для перепрограмування і діагностики вузлів системи по одній лінії при побудові системи з готових індустриальних компонентів (COTS) на базі МК та засобів розробки, що дає можливість здешевити їх проектування. Запропоновані елементи методу дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації вузлів вбудованої системи на базі МК. Наведено практичний приклад реалізації концепцій розглянутих у статті, включаючи реконфігурацію; наводиться кілька схем пристрою до і після виконання його реконфігурації у разі конкретної відмови. Практичне значення даного дослідження полягає у можливості побудови і налаштування системи з великої кількості окремих вузлів на базі МК.

Ключові слова: реконфігуропритатність; реконфігурація; bootloader; внутрішньосистемне перепрограмування; зв'язок по одній лінії; однопровідний UART.

Вступ

Сучасна промисловість надає багато апаратних рішень для побудови систем на базі спеціалізованих мікросхем або мікропроцесорних систем (МПС) серійного виробництва [1]. Такі рішення знаходять своє застосування в бортових системах, включаючи аерокосмічні системи, де діють особливі вимоги до показників надійності та можливості реконфігурації.

Системи на базі мікропроцесорів містять програмний код, який вирішує поставлену задачу. Застосування подібних підходів дає можливість знизити ціну в розрахунку на один екземпляр системи, а використання МПС дозволяє гнучко модифікувати алгоритм у прошивці шляхом її перепрограмування.

Слід зазначити, що виробники готових рішень використовують далеко не всі можливості сучасної елементної бази для підвищення їх відмовостійкості

або енергозбереження. Використання цих додаткових можливостей бази стає у нагоді при розробленні бортових систем і частин інфраструктури будівель.

Отже існує можливість забезпечення гнучкої зміни конфігурації технічних систем на базі МПС, спрямовані на врахування можливих відмов [2] або виправлення помилок конкретного екземпляру обладнання, що буде сприяти підвищенню його живучості у разі деградаційних відмов. Зазвичай апаратна надлишковість має доповнюватись програмною надлишковістю шляхом використання флеш-пам'яті.

Повсюдне застосування компонентів для швидкого прототипування вже дозволяє знизити трудовитрати і вартість перевірки працездатності окремого концепту цифрової системи [3]. Універсальність і доступність таких компонентів на основі мікроконтролерів (МК) дає можливість здійснювати таке прототипування дистанційно групою розробників [3].

Масове застосування адитивних технологій і 3d-друку дозволяє використовувати мініатюрні серійні компоненти на основі МК для побудови цифрових пристроїв, периферії та компонентів розумного будинку. Подальша мініатюризація та серійний випуск компонентів на основі МК дозволить безпосередньо додавати такі системи як витратний матеріал для 3d друку.

При суттєвому збільшенні кількості вузлів та зниженні вартості за один МК стає актуальною задача діагностики стану вузлів, перепрограмування окремих вузлів, виявлення та відновлення деградційних відмов [4, 5].

Метою даної роботи є підвищення надійності систем, побудованих із використанням апаратного забезпечення на базі мікропроцесорів (МП). Для досягнення поставленої мети в даній роботі розглядаються та вирішуються такі **задачі**:

- відшукування методу комунікації набору МК у системі з можливістю уточнення вимог;
- відшукування можливості дистанційного перепрограмування окремих МК у складі цільової системи;
- пошук способу додавання надмірності в схему підключення МК для можливості реконфігурації;
- сформулювати елементи методу і послідовність розроблення систем, які передбачають можливість дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації їх окремих вузлів;
- розроблення прототипу МПС на основі розглянутого рішення конкретного виробника для демонстрації запропонованого підходу з метою внесення елементів надлишковості.

1. Визначення термінів у межах роботи

Таким чином, у рамках даної роботи під вузлом або компонентом системи слід розуміти окремий МК. Система може складатися з одного або декількох вузлів, що взаємодіють. Ця взаємодія здійснюється завдяки підключенню вузлів до єдиного каналу зв'язку і є дистанційною по відношенню до вузла.

Під діагностикою вузлів системи розуміється процес передачі інформації про їх технічний стан, у тому числі з опціональною можливістю опитування та перевірки ліній на схемі для дослідження стану монтажних з'єднань у схемі підключення МК.

Під перепрограмуванням вузла системи мається на увазі процес заміни програми у флеш пам'яті конкретного МК без безпосереднього підключення до нього програматорів або зовнішніх інструментів.

Під реконфігурацією вузла системи розуміється процес зміни основної програми в МК для реалізації нових функцій або підтримка частини існуючих функцій у разі виявлення відмови.

2. Аналіз можливих варіантів забезпечення реконфігуропрдатності

Побудова системи з використанням модулів із модифікованим завантажувачем дозволяє суттєво спростити процес програмування і перепрограмування, а також тонко керувати параметрами чіпу.

Для більшості МП рішень є можливість завантажувати основний текст програми у чіп через bootloader, змінюючи існуючу програму. При цьому оригінальний bootloader може бути встановлений ще на етапі виробництва. Такий підхід дає можливість виключити використання спеціалізованого програматора, який є складовою системи та перепрограмувати МП, використовуючи лише лінію UART [6].

В цьому випадку актуальною є задача надання можливості одному чіпу у складі ансамблю подібних до нього чіпів перепрограмувати інші. Це робить можливим процес відновлення окремих вузлів, у складі системи, якщо під час розроблення системи така можливість була передбачена заздалегідь.

Якщо окремі вузли виступають в якості посередника для перепрограмування інших, стає можливим здійснення поетапного відновлення окремих компонентів системи без безпосереднього доступу до них. Окрім того одні компоненти МПС можуть виступати у якості діагностуючих. Знання топології плат і підключеної периферії дають можливість виконувати діагностику з'єднань на друкованій платі за рахунок завантаження в такі вузли модифікованих прошивок. Цей процес може здійснюватися за участю інших вузлів-посередників.

Використання спеціалізованих програмних пакетів для створення та модифікації прошивки (firmware) може суттєво спростити процес їх створення і забезпечити можливість параметризації за інформацією про конфігурацію і властивості МПС. Ці параметри можна доповнити даними на основі аналітичних результатів. Також у процесі розробки можуть бути використані елементи штучного інтелекту. Застосування всіх цих інструментів в комплексі дає можливість на основі специфікацій на розроблення системи передбачати можливу обв'язку, структуру для заданих елементів, а також передбачити можливість її подальшої реконфігурації.

Якщо технічна можливість перепрограмування була передбачена на етапі проектування, то окремі компоненти системи отримують можливість виконувати завантаження нових програм у склад інших для діагностики оточуючих схем і перевірки коректності підключення і монтажу. У випадку наявності доступу до firmware конкретного вузла системи існує можливість подальшого дистанційного програмування через вузли-посередники для відновлення оригінальних функцій кожного з них.

Дистанційна діагностика схем може бути реалізована навіть якщо спочатку вона не була передбачена. Завдання дистанційної діагностики пристрою може бути вирішене завдяки організації таких зв'язків комунікації та можливості реконфігурації за допомогою перепрограмування. Така можливість надає більш серйозні функції, ніж заздалегідь передбачені можливості діагностики на рівні кристалу одноразово запрограмованого МК [7]. Перевага такого підходу ґрунтується на тому, що може бути використано весь вільний ресурс FLASH-пам'яті чіпу МК винятково для задач діагностики.

Таке рішення може дозволити виконати децентралізований процес перевірки працездатності системи в цілому. Це може бути здійснено за допомогою періодичної та планової перевірки її стану з поверненням компонентів до нормального стану у після цього.

Можливість застосування такого концепту для критичних систем має бути розглянуто окремо. Але запропонована ідея побудови перепрограмованих рішень такого роду заздалегідь має широкий спектр застосування в системах, де може бути виконана планова зупинка функціонування для діагностики з використанням таких розширених функцій.

Відновлення самої схеми у разі відмови однієї з ліній портів або механічного пошкодження схем також стає можливим при використанні перепрограмування всередині системи. Запропонований підхід дає можливість виконувати часткову реконфігурацію схем і повну зміну програми роботи складових частин апаратної системи за рахунок їх дистанційного перепрограмування безпосередньо всередині системи.

Часткова реконфігурація схеми може бути забезпечена модифікацією набору ліній у складі схеми окремого МК зі заздалегідь передбаченою надмірністю. Така надмірність у випадку апаратної відмови ліній у складі мікроконтролера, монтажу у складі плати чи інших несправностей поза чіпом може дозволити виконати ряд дій для повного або часткового відновлення функцій системи. Відновлення можливе там, де реалізована спроможність заміни монтажних з'єднань за допомогою резисторів підтяжки, ємностей зв'язків чи додаткових ліній комунікації.

Використання лінії скидання reset в якості звичайного порту загального призначення як додаткова можливість надається більшістю мікроконтролерів. Це може бути зроблено за допомогою модифікації ф'юзу з використанням спеціалізованого програматора [8]. Після виконання такої процедури програмування МК за допомогою звичайного низьковольтного програматора стає неможливим і він втрачає можливість скидання без модифікації ф'юзу. В свою

чергу модифікація ф'юзу стає неможливою без високовольтного паралельного програматора, що ускладнює процес програмування МК штатними засобами. Bootloader дає можливість використовувати штатний програматор без використання високовольтного паралельного програматора.

Якщо перед зміною ф'юзу в МК завантажити bootloader з підтримкою роботи без лінії reset, то можливість програмування такого компонента зберігається. Використання у складі bootloader спеціальної логіки та наявність у прошивці алгоритмів для емуляції сигналу скидання reset надає можливість ініціювати початок завантаження програми у МК.

У випадку емуляції сигналу скидання reset можна об'єднати використання окремих ліній у складі МК як для виконання функцій порту відповідно до вимог проекту користувача, так і для керування процесом завантаження програмного коду у мікроконтролер. Такий підхід дає можливість зробити процес завантаження нових програм у МК більш гнучким оскільки дозволяє зберегти сумісність запропонованого підходу з існуючими засобами розроблення та програмування МК.

Перевагою запропонованого підходу є можливість звільнення однієї з ліній у складі МК для використання у якості звичайного порту. Ця лінія може використовуватись в якості лінії керування периферійними пристроями, приєднаними до поточного МК. Вона також може бути використана в якості резервного каналу взаємодії та обміну даними з іншими МК.

Використання однієї лінії зв'язку для підключення набору вузлів дозволяє спростити процедуру взаємодії та знизити структурну складність схеми. Це доречно на вирішення поодиноких завдань вибіркового перепрограмування і діагностики.

До популярних стандартів комунікації з та без використання диференціальних ліній і підключенням як польова шина слід віднести RS485, Profibus, CAN, Modbus [9], CC-Link, FlexRay, HART та інші. Також слід звернути увагу на зовсім новий стандарт 802.3cg-2019. Це 10-мегабітний Ethernet з єдиною парою ліній та прямим монтажним підключенням до багатьох пристроїв на великій відстані [10]. Недоліком цих стандартів комунікації є необхідність підтримки складних протоколів.

Відомі спеціалізовані однопровідні протоколи комунікації, серед яких слід зазначити 1-wire. Але найбільший інтерес з погляду універсальності представляє набір протоколів, сумісних з UART. Слід згадати GBus (з бібліотекою GyverBus) і M-Bus. Ця шина за протоколом сумісна з UART, і при цьому є однією двонаправленою лінією. Передавання по цій лінії може ініціювати будь-який з вузлів. Один починає передавати, а решта в цей момент приймає.

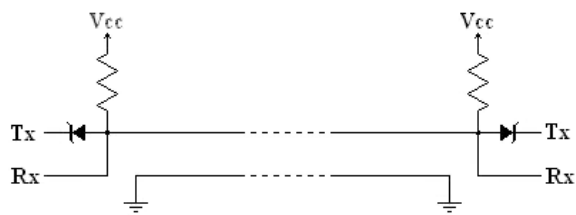


Рис. 1. Приклад з'єднання 2 вузлів по одній лінії зв'язку

Більшість часу усі вузли такої шини перебувають у режимі прийому. У разі необхідності передачі, вузол запускає таймер і дивиться, чи лінія переведена в нуль. Якщо – не була, вузол починає передавати за допомогою звичайного асинхронного протоколу UART. Передача починається з нульового старт-біту, за яким слідує інформативні біти і стоп-біт.

Такий спосіб взаємодії дає можливість використовувати лише одну лінію з підтяжкою для підключення великої кількості МК. Резистор підтяжки потрібен для організації можливості організації взаємодії «більшість до більшості» у випадку інтенсивних обмінів. Також може бути доданий діод для можливості використання апаратної реалізації UART. Простий приклад використання такої лінії зв'язку представлений на рисунку 1.

Для реалізації розглянутого підходу не потребується складних апаратних рішень. Зберігається сумісність зі стандартними TTL контролерами та стандартними засобами моніторингу порту для інтерфейсу UART. Складністю такого підходу є необхідність доопрацювання програмної реалізації інтерфейсу UART. В частині МК існують апаратні рішення для обміну по інтерфейсу UART, які дозволяють виконувати прийом та передавання даних. Недоліком також є можливість апаратної відмови одного з МК та константної підтяжки лінії до нуля.

Перевагою такого підходу є простий варіант монтажу і проста топологія зв'язків. Це не вимагає організації високочастотних ліній як у I2C. Частоти обміну відповідають стандартному ряду UART.

Боротьба з колізіями є невід'ємною частиною під час обмінів між окремими МК по одній лінії зв'язку, яке передбачає можливість появи колізій.

Таким чином, для боротьби з колізіями під час обміну по одній лінії зв'язку пропонуються кроки:

- 1) перевірка контрольної суми і довжини послілки UART;
- 2) на основі таймера виділяються слоти в часі;
- 3) якщо шина зайнята або два вузли намагаються передати одночасно, то обидва переходять в режим очікування на певний випадковий для кожного вузла час, після закінчення якого обидва знов починають передавання;
- 4) кожен вузол має змогу контролювати передавання інформації, яка приходить йому на вхід.

Перепрограмування окремих МК у складі системи з використанням однієї лінії зв'язку є наступним кроком проектування систем, які передбачають реконфігурацію.

При реалізації такого підходу можуть використовуватись стандартні засоби розроблення та програмування МК із використанням однієї лінії. Це включає можливість завантаження у МК та створення програм-прошивок для окремих вузлів, які зможуть перепрограмувати інші вузли. Цей процес перепрограмування відбувається із використання спільної лінії зв'язку. Всі інші вузли в цей момент призупиняють обмін через цю лінію.

Існуючі засоби розроблення для МК і їх програмування надають можливість персоналізації і додаткових налаштувань.

В якості прикладу може бути розглянутий набір сумісних засобів розробки для мікроконтролерів AVR від компанії Atmel (з 2016 у складі MicroChip). Вони дають можливість виконувати перепрограмування через лінії reset, яка може бути підтягнута до 0, після чого завантажений у чіп bootloader починає свою роботу. Використання цього ефекту може бути застосовано для підміни bootloader нальоту [6, 11]. Такий підхід дозволяє досягнути поставленої мети, а саме можливості перепрограмувати окремі вузли у складі працюючої системи без їх вилучення.

Виділення окремого вузла для збереження резервних копій попередніх прошивок для використання програми-прошивки для програмування МК у складі системи дозволяє заготовити колекцію для перепрограмування залежно від ситуації. Виділений МК має містити діагностичні прошивки, які в ньому розташовані заздалегідь. За необхідності він також може, виконувати перезавантаження та перепрограмування окремих вузлів у складі системи, що необхідно для вирішення завдань діагностики або наступного системи.

Також у такому особливому вузлі може зберігатися набір заготовлених програм для перебудови системи в залежності від поточного режиму. Перебудова передбачає можливість відновлення частини функцій чи передачі окремих функцій від одного набору МК іншому.

Розглянуті рішення та можливість комунікації між окремими вузлами дозволяють знизити вартість системи за рахунок використання чипів з нижнього цінового сегменту. Додатковою перевагою є можливість перепрограмування вузлів такої системи на льоту безпосередньо у складі системи та здатність виконувати самодіагностику проведеної реконфігурації. Додавання надмірності на рівні апаратного монтажу і можливості перепрограмування прошивок дають можливість відновлення системи після певних видів відмов системи.

3. Аналіз переваг керування енергоспоживанням

Використання такої загальної єдиної лінії комунікації дозволяє виконувати пробудження окремих вузлів у складі системи і переводити в режим глибокого сну решту вузлів у випадку їх невикористання з метою економії енергії. Це дозволяє суттєво знизити енергоспоживання системи і загалом керувати енергоспоживанням при побудові систем, які містять елементи живлення.

Такий підхід також може бути актуальним для побудови розподілених систем моніторингу та інформування, в яких окремі вузли мають змішаний тип живлення з акумуляторним чи сонячним живленням. При такому способі функціонування системи існує необхідність періодичного пробудження її компонентів для комунікації чи діагностики потрібних вузлів.

Виробник МК надає можливість гнучко керувати енергоспоживанням складових МК. Подібні операції можна виконувати шляхом вмикання чи вимикання складових МК через реєстри, які керують енергоживленням. До таких складових МК слід віднести в першу чергу АЦП, таймери-лічильники, компаратори і живлення портів.

У випадку необхідності є можливість переведу всього МК в режим глибокого сну для зниження енергоспоживання. Використання ліній комунікації з'єднаної з входами зовнішнього переривання дозволяє керувати пробудженням МК у випадку появи сигналу на спільній лінії комунікації. Перевірка адреси окремого вузла дозволяє виконати його перехід у подальший сон, або активізувати у випадку збігу адреси. Реалізація такої підходу дозволяє виконувати пробудження з глибокого сну чи режиму зниженого енергоспоживання лише ті вузли, активність яких наразі необхідна.

4. Аналіз варіантів забезпечення безпеки та відмовостійкості рішень

Шифрування обмінів між МК може бути застосовано для підвищення ступеня захисту загального інтерфейсу між окремими вузлами [12]. Як захід для підвищення інформаційної стійкості системи бажано застосовувати один із криптопримітивів, що дозволить знизити вірогідність виникнення помилки під час обміну даними між окремими вузлами та виправити помилки у випадку використання оптичного чи радіоканалу. Використання криптопримітивів також може частково запобігти процесу реверс-інжинірингу, прослуховуванню та проникненню у склад системи злоумисника.

Найбільш перспективними для використання є неприведені поліноми. Вони застосовуються для побудови елементів з надмірністю і можливістю побудови шифрування послідовності за допомогою генераторів з використанням LFSR. Можна також застосовувати криптопримітив на основі S-Box, що дає можливість змінювати послідовності бітів, що пересилаються, з використанням підстановки байтів за наявною таблицею.

У класичному випадку після застосування вихідної таблиці виконання реверс-інжинірингу даних є максимально складною задачею, що дозволяє передавати дані по відкритому каналу обміну. Це пояснюється тим, що набори даних, які розташовані послідовно, після проходження процедури підстановки являють собою білий шум.

Додатковим ступенем захисту може виступати модифікація закону формування повідомлень у складі обміну по заздалегідь встановленому для всіх вузлів алгоритму. Спільними рисами та сигналами можуть виступати паузи між обмінами даних та окремими словами, а в якості сигналів синхронізації – проміжки часу чи інтенсивність обмінів.

При такій організації системи Після відключення одного з елементів мережі на деякий період часу від загального обміну залишається можливість коректної роботи після його вмикання. Зберігається також можливість його синхронізації та автоналаштування способу дешифрування повідомлень у складі загальної лінії обміну без необхідності повторення усієї множини повідомлень.

Зазначений підхід з реалізацією захисту з використанням елементів криптографії дозволяє підвищити стійкість системи при тимчасовому відключенні окремих вузлів системи і не дозволить використати криптоаналіз, спираючись лише на послідовність даних, які пересилаються.

Це вимагатиме від криптоаналітика використання додаткових способів аналізу, таких як аналіз за часом чи аналіз за енергоспоживанням. Здійснення таких видів аналізу потребує можливості безпосереднього доступу до системи і ускладнює процес реверс-інжинірингу системи і каналу обміну.

Підвищення надійності системи може бути досягнуто завдяки додаванню надмірності [13, 14]. Прикладом елементів надлишковості може бути використання множини ліній аналого-цифрового перетворювача у складі МК. Доступ до цих ліній виконується через елементи навантаження чи через лінії вимкненої периферії, які можуть бути використані для вирішення майже всіх завдань.

Для використання лінії МК у такому режимі необхідно перевести лінію в режим зчитування рівня напруги і виконувати необхідні дії програмно.

Серед можливих прикладів використання слід відзначити аналіз послідовних інтерфейсів з низькою пропускну здатністю, аналіз фізичного монтажу і відсутності пошкоджень такого монтажу на виході. По таких лініях можлива також комунікація, хоча пропускну здатність зазвичай знижується порівняно із апаратною реалізацією інтерфейсу обміну.

Апаратні способи передавання даних можуть бути доповнені можливостями додаткового аналізу ліній і виводів, до яких апаратні блоки МК підключені через навантаження чи периферійні пристрої.

Подібний спосіб резервування ускладнює реалізацію, оскільки потребує додаткових складних програмних рішень, хоча необхідність їх написання може виникнути вже після введення системи в експлуатацію.

Однак, знаючи про можливі складнощі з розробленням програмного забезпечення, можливо передбачити маловитратні апаратні заготовки для подальшої їх програмної активації. Для цього потрібний попередній аналіз і розуміння можливості написання такого коду до початку проектування апаратної схеми. Аналіз дає можливість вибрати пріоритетні варіанти використання портів МК для внесення надлишковості безпосередньо в сам монтаж і розведення схеми його підключення. Цей підхід дає можливість подальшого перепрограмування такого МК із можливістю задіяти ці лінії в подальшому, і сприятиме полегшенню його перепрограмування. Можливість задіяти звільнені лінії в майбутньому дозволить відмовитися від використання додаткових елементів при виробництві пристрою.

Можливі кілька способів реалізації запропонованого рішення. Перший підхід полягає у наданні доступу до окремих ліній через лінії підтяжки у складі МК через ємнісні зв'язки і спільне навантаження. Другий підхід полягає в підвищенні струмових характеристик окремих виводів МК шляхом використання кількох ліній одного порту або ліній різних портів. Він є доречним оскільки за специфікацією виробника МК найбільші спільні показники струмів можливі для його виводів у випадку використання окремих портів. Цей підхід представляється більш перспективним, оскільки струми на виводах МК матимуть найбільш близькі значення.

Додатковою можливістю можна розглядати використання таких виводів портів для комутації токів у навантаженні з регульованим споживанням, коли одна з ліній може бути задіяна с якоюсь підтяжкою через резистор з кінцевою лінією керування. У випадку відмови керуючого транзистора можливо живити цільовий пристрій невеликим струмом через лінію порту самого МК. Такий спосіб можна застосувати там де існує можливість живлення струмом до 50 мА, наприклад, для живлення світлодіодів.

Крім того, зберігається можливість використання пристрою за призначенням у режимі обмеженої функціональності але зі збереженням функцій. Подібна перебудова системи має перевести апаратне рішення у наступний стан неповної функціональності але зі збереженням набору функцій, що зберігає можливість експлуатації і використання компонента з частковими або обмеженими властивостями.

Перевагою такого підходу є можливість множинного і багаторівневого зменшення набору можливостей системи, що спричиняє деградація її властивостей зі збереженням мінімальної функціональності або можливістю діагностування стану із подальшою перебудовою системи.

Для зниження трудовитрат при проектуванні таких систем може бути використано набір спеціальних пакетів чи елементів штучного інтелекту, що дозволить знизити трудовитрати розробника на аналіз для створення можливих елементів надмірності як під час трасування плат та і при побудові схем. Наступним кроком може виступати використання таких рішень для написання окремих версій проектів із виправленнями для відновлення функцій для кожного із можливих випадків відмови.

Такий підхід дозволяє повністю виключити або знизити вірогідність виникнення помилок чи дефектів під час проектування викликаних людським фактором і підготувати усю множину можливих програм-прошивок для кожного з сотні варіантів відмов. Доцільно зберігати ці прошивки у файлової системі у складі окремого флеш-накопичувача чи флеш-мікросхеми для можливості виявлення, діагностики та виправлення виявлених відмов.

Вартість такого рішення невелика, оскільки існує множина окремих мікросхем флеш-пам'яті з місткістю, яка суттєво перевищує місткість пам'яті окремого МК. Такі мікросхеми пам'яті підтримують кількох доступних інтерфейсів обміну, а їх вартість невелика порівняно із вартістю МК.

Додавання такого елемента у склад схеми дає можливість доповнити схему здібністю перепрограмування в залежності від діагностованого виду відмови, що забезпечує перехід схеми без участі людини в один із необхідних режимів. З іншого боку, використання таких чипів дозволяє знизити вірогідність відмови за рахунок малої кількості виводів. До того ж використання технологій флеш-пам'яті сприяє стійкості до Single Event Upset відмов, які викликані нейтронним та космічним випромінюванням.

Розглянуті способи організації системи надають можливість відновлення системи після відмови чи збою по енергоживленню, оскільки флеш-пам'ять є енергонезалежною, що дозволяє при необхідності зберігати весь набір прошивок і програм незалежно від живлення.

5. Послідовність побудови систем з підтримкою дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації вузлів

Поєднання можливості організації взаємодії по одній лінії, можливості модифікації bootloader, можливості дистанційної діагностики і перепрограмування, можливості зміни функцій схеми завдяки внесеній надмірності дозволяє сформулювати процедуру розроблення відмовостійких систем з поступовою деградацією на базі готових індустріальних компонентів (COTS) на базі МК, за рахунок можливості дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації окремих вузлів вбудованої системи.

Таким чином, для забезпечення можливості перепрограмування таких апаратних рішень на основі МК пропонується така послідовність:

- 1) модифікувати завантажувач для забезпечення нових додаткових функцій МК;
- 2) визначити вузли, при проектуванні яких потрібно реалізувати можливість їх перепрограмування, і модифікувати схему пристрою, яка таку можливість реалізує;
- 3) додати потенційно надлишкові елементи до схеми під час прототипування для забезпечення можливості подальшого ремонту;
- 4) використовувати перепрограмування окремих вузлів для проведення діагностики схеми;
- 5) використовувати однолінійний зв'язок в якості простого способу зв'язку між вузлами;
- 6) додати шифрування на основі LFSR або sBox для покращення захисту зв'язку через інтерфейс;
- 7) використовувати автоматизовані інструменти для розроблення апаратної та програмної частини із зазначеними функціями, що дозволить зменшити витрати на проектування.

6. Розроблення прототипу на основі запропонованого методу

Описана концепція була реалізована для отримання масштабованих, відтворюваних і дешевих некритичних периферійних компонентів розумного будинку.

У наведеному прикладі розглядається панель керування з чотирма кнопками на основі фоточутливих діодів. Цей компонент системи побудований на чіпі Atmega8A зі спеціально розробленим завантажувачем, який дозволяє перепрограмувати цей МК за допомогою загальної лінії зв'язку.

Периферійні компоненти, відповідальні за механічне перемикання контактів, мають обмежений життєвий цикл. Ця проблема основана на деградації металевих контактів перемикача.

Для поліпшення показників надійності реалізовані оптичні кнопки. Крім того, перед створенням модуля було змодельовано набір можливих відключень ліній у схемі. Модуль АЦП, внутрішньо підключений до порту С МК, призначений для вимірювання сигналів від фотодіодів. Нормальний режим роботи представлений на рисунку 2. Для зменшення енергоспоживання резистори підтягування підключаються до виводу того ж порту. Цей вибір також є різновидом резервування.

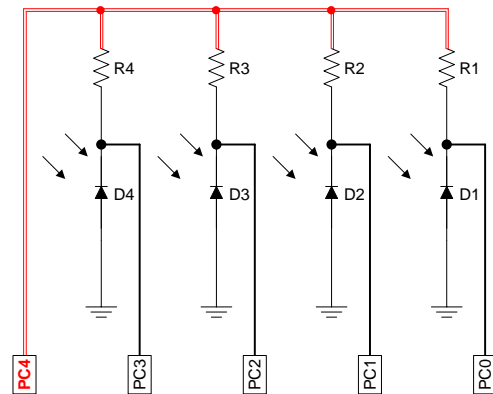


Рис. 2. Нормальна робота схеми панелі з 4 фотокнопками

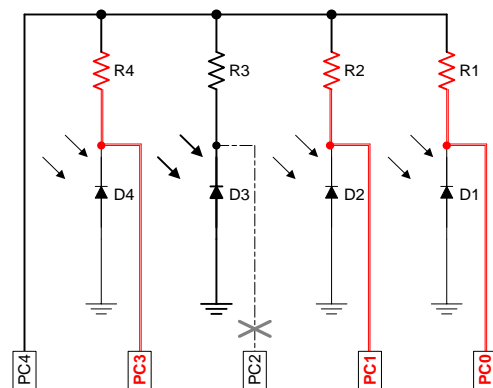


Рис. 3. Отримання сигналу з D3 після реконфігурації

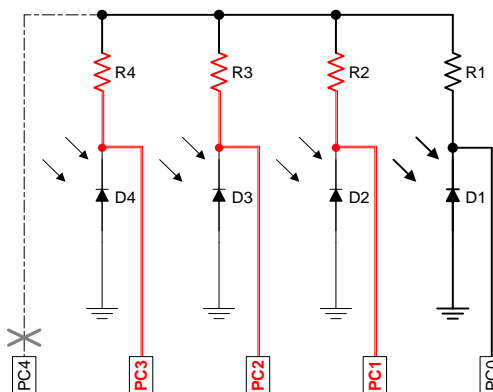


Рис. 4. Приклад конфігурації у разі відриву загальної лінії підтяжки

Панель з фотодіодами і підтягуючими резисторами підключається до друкованої плати з МК за допомогою дротової шини. Це найбільш вразливий до механічних пошкоджень елемент системи. Якщо один із виводів МК відключений, цю проблему можна виявити за допомогою програми діагностики з перевіркою цілісності схеми.

Якщо відключеною лінією є загальна підтягуюча лінія, діоди можна отримати один за одним із підтягуванням через інші порти, підключені до діодів. Якщо відключеною лінією є лінія, пов'язана з діодом, сигнал від цього діода можна отримати через загальну підтягуювальну лінію, налаштовану як вхід АЦП, як показано на рисунку 3.

Висновки

Запропоновано підхід до розроблення відмовостійких систем з поступовою деградацією на базі готових індустріальних компонентів (COTS) на базі МК, за рахунок можливості дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації окремих вузлів вбудованої системи.

Для цього проаналізовано можливі технічні рішення та теоретичні основи внутрішньосистемного перепрограмування вузлів системи на базі МК.

Представлено можливість використання лінії скидання reset для збереження можливості перепрограмування МК за допомогою bootloader. Запропоновано ідею перепрограмування та діагностики вузлів системи по одній лінії за допомогою готових індустріальних компонентів (COTS) на базі мікроконтролерів та засобів розробки, що дає можливість здешевити їх розроблення.

Запропоновані технічні рішення дають можливість підвищити надійність системи на основі вузлів з використанням МК, забезпечити керування енергоспоживанням цих вузлів та способи захисту лінії зв'язку на рівні bootloader.

Іншою перевагою підходу на основі дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації окремих вузлів можна вважати можливість організації зв'язку між МК за допомогою простішого інтерфейсу, який відповідає монтажному з'єднанню з використанням однієї лінії зв'язку. Це найпростіший у реалізації спосіб з'єднання вузлів на відміну від складних протоколів взаємозв'язку МК з використанням інтерфейсів I2C, CAN, багатокористувацький SPI чи модифікації RS485.

Для систем не критичного застосування, є доцільним використання рішень на основі ліній комунікації з описаними властивостями. Запропонований підхід може бути корисним для вирішення завдань моніторингу, зважаючи на простоту реалізації обміну і відносно нескладність апаратної реалізації.

Запропоновано семикрокову процедуру розроблення таких систем. Наведено практичний приклад реалізації концепцій розглянутих у статті, включаючи її реконфігурацію; наводиться схема пристрою до і після виконання його реконфігурації.

Запропоновані елементи методу дистанційної діагностики, перепрограмування і реконфігурації окремих вузлів вбудованої системи на базі МК.

Практичне значення даного дослідження полягає у можливості побудови і налаштування системи з великої кількості окремих вузлів на базі мікроконтролерів. Цей крок дозволяє розглядати побудову систем із функціями цифрових пристроїв з використанням адитивних технологій та 3d друку.

Література

1. Plakhteyev, A. *Edge computing for IoT: An educational case study [Text]* / A. Plakhteyev, A. Perepelitsyn, V. Frolov // *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*. – 2018. – P. 130–133. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409113.
2. *Diversity metric evaluation considering extended NUREG-7007 diversity classification [Text]* / V. Duzhyi, V. Kharchenko, A. Panarin, D. Rusin // *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*. – 2018. – P. 21–25. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409092.
3. Vdovichenko, O. *Technologies for building systems of remote lining of communication lines: a practical example of implementation [Text]* / O. Vdovichenko, A. Perepelitsyn // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2021. – No. 2. – P. 31–38. DOI: 10.32620/reks.2021.2.03.
4. Поночовний, Ю. Л. *Методологія забезпечення гарантоздатності інформаційно-керуючих систем з використанням багатоцільових стратегій обслуговування [Текст]* / Ю. Л. Поночовний, В. С. Харченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2020. – № 3. – С. 43–58. DOI: 10.32620/reks.2020.3.05.
5. *Исследование подходов к построению орбитальной вычислительной сети спутниковой системы Интернета Вещей [Текст]* / М. Е. Ильченко, Т. Н. Нарытник, В. И. Присяжный, С. В. Капштык, С. А. Матвиенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 8. – С. 138–151. DOI: 10.32620/akt.2019.8.21.
6. Lewandowski, M. *Dedicated AVR Bootloader for Performance Improvement of Prototyping Process [Text]* / M. Lewandowski, T. Orczyk, P. Porwik // *2017 MIXDES – 24th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*. – 2017. – P. 553–557. DOI: 10.23919/MIXDES.2017.8005274.
7. *Embedded Hardware Testing Using Bootloader [Text]* / A. Rath, D. Roy, D. Teja, G. Kumar // *Internationa*

tional Conference on Smart Electronics and Communication, ICOSSEC 2020. – 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICOSSEC49089.2020.9215327.

8. ATmega8A Data Sheet [Online]. – Microchip Technology Inc., 2020. – 324 p. – Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega8A-Data-Sheet-DS40001974B.pdf>. – 19.10.2022.

9. Kolisnyk, M. Vulnerability analysis and method of selection of communication protocols for information transfer in Internet of Things systems [Text] / M. Kolisnyk // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2021. – No. 1 – P. 133–149. DOI: 10.32620/reks.2021.1.12.

10. IEEE P802.3cg 10Mb/s Single Pair Ethernet: A guide [Text] / G. Zimmerman, P. Jones, J. Lewis, P. Beruto, S. Graber, H. Stewart. – Cisco Systems Inc., 2019. – 40 p.

11. Sebastian, A. Design of a Dynamic Boot Loader for Loading an Operating System [Text] / A. Sebastian, S. Sankar // *Journal of Computer Science*. – 2019. – Vol. 15, no. 1. – P. 190–196. DOI: 10.3844/jcssp.2019.190.196.

12. Technique for IoT malware detection based on control flow graph analysis [Text] / K. Bobrovnikova, S. Lysenko, B. Savenko, P. Gaj, O. Savenko // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2022. – No. 1 – P. 141–153. DOI: 10.32620/reks.2022.1.11.

13. FPGA platform-based NPP I&C systems: Case study of diversity assessment and selection [Text] / V. Kharchenko, E. Brezhnev, V. Sklyar, V. Duzhyi // *Proceedings of the 9th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, NPIC and HMIT 2015*. – 2015 — P. 93–102.

14. Tyurin, S. Hyper redundancy for super reliable FPGAs [Text] / S. Tyurin // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2021. – No. 1. – P. 119–132. DOI: 10.32620/reks.2021.1.11.

References

1. Plakhteyev, A., Perepelitsyn, A., Frolov, V. Edge computing for IoT: An educational case study. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, 2018, pp. 130–133. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409113.

2. Duzhyi, V., Kharchenko, V., Panarin, A., Rusin, D. Diversity metric evaluation considering extended NUREG-7007 diversity classification. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, 2018, pp. 21–25. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409092.

3. Vdovichenko, O., Perepelitsyn, A. Technologies for building systems of remote lining of communication lines: a practical example of implementation. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2021, no. 2, pp. 31–38. DOI: 10.32620/reks.2021.2.03.

4. Ponochovnyi, Y., Kharchenko, V. Metodologiya zabezpechennya harantozdatnosti informatsiynokeruyuchykh system z vykorystanniam bahatotsil'ovykh stratehiy obsluhovuvannya [Dependability assurance methodology of information and control systems using multipurpose service strategies]. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2020, no. 3, pp. 43–58. DOI: 10.32620/reks.2020.3.05.

5. Ilchenko, M., Narytnyk, T., Prisyazhny, V., Kapshtyk, S., Matvienko, S. Issledovaniye podkhodov k postroyeniyu orbital'noy vychislitel'noy seti sputnikovoy sistemy Interneta veshchey [Research of approaches to the development of the orbital computing network for the satellite system of Internet of Things]. *Aerospace Technic and Technology*, 2019, no. 8, pp. 138–151. DOI: 10.32620/akt.2019.8.21.

6. Lewandowski, M., Orczyk, T., Porwik, P. Dedicated AVR Bootloader for Performance Improvement of Prototyping Process. *2017 MIXDES – 24th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*, MIXDES 2017, 2017, pp. 553–557. DOI: 10.23919/MIXDES.2017.8005274.

7. Rath, A., Roy, D., Teja, D., Kumar, G. Embedded Hardware Testing Using Bootloader. *International Conference on Smart Electronics and Communication, ICOSSEC 2020*, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICOSSEC49089.2020.9215327.

8. ATmega8A Data Sheet. Microchip Technology Inc., 2020. 324 p. Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega8A-Data-Sheet-DS40001974B.pdf>. (accessed 19.10.2022).

9. Kolisnyk, M. Vulnerability analysis and method of selection of communication protocols for information transfer in internet of things systems. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2021, no. 1, pp. 133–149. DOI: 10.32620/reks.2021.1.12.

10. Zimmerman, G., Jones, P., Lewis, J., Beruto, P., Graber, S., Stewart, H. *IEEE P802.3cg 10Mb/s Single*. Cisco Systems Inc., 2019. 40 p. Available at: https://www.ieee802.org/3/cg/public/Jan2019/Tutorial_cg_0119_final.pdf. (accessed 19.10.2022).

11. Sebastian, A., Sankar, S. Design of a Dynamic Boot Loader for Loading an Operating System. *Journal of Computer Science*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 190–196. DOI: 10.3844/jcssp.2019.190.196.

12. Bobrovnikova, K., Lysenko, S., Savenko, B., Gaj, P., Savenko, O. Technique for IoT malware detection based on control flow graph analysis. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2022, no. 1, pp. 141–153. DOI: 10.32620/reks.2022.1.11.

13. Kharchenko, V., Brezhnev, E., Sklyar, V., Duzhyi, V. FPGA platform-based NPP I&C systems: Case study of diversity assessment and selection. *Proceedings of the 9th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, NPIC-HMIT 2015*, 2015, pp. 93–102.

14. Tyurin, S. Hyper redundancy for super reliable FPGAs. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2021 no. 1, pp. 119–132. DOI: 10.32620/reks.2021.1.11.

Надійшла до редакції 19.10.2022, розглянута на редколегії 20.11.2022

METHOD OF REMOTE DIAGNOSTICS, REPROGRAMMING AND RECONFIGURATION OF NODES OF EMBEDDED SYSTEM

Oleksandr Vdovichenko, Artem Perepelitsyn, Viacheslav Duzhyi, Olexander Zheltukhin

The subject of study in this article is a method for remote diagnostics, reprogramming and reconfiguration of nodes of embedded and small-sized systems. The **goal** is to increase the reliability characteristics of systems built on the basis of microprocessor solutions. The **task** is: to consider the existing methods of communication of the MC set in the system with the possibility of specifying the requirements; consider and analyze the existing means of remote reprogramming of individual MCs as part of the target system; to consider methods of adding redundancy to the MC connection scheme for the possibility of reconfiguration; describe the elements of the method and sequence of development of systems that provide for the possibility of remote diagnostics, reprogramming and reconfiguration of their individual nodes. According to the tasks, the following **results** were obtained. The existing methods and equipment for communication of the MC set are analyzed. Possible technical solutions and theoretical foundations of intra-system reprogramming of system nodes based on MK are analyzed. The technical properties of one of the available industrial technologies, which contain crystals and development media, are presented, with the aim of finding properties that will allow expanding the capabilities of the created systems in terms of increasing reliability and energy efficiency. It is proposed to use a modified bootloader to organize the possibility of communication and reprogramming over one communication line. A set of steps is proposed for finding options for building a circuit with hardware redundancy. **Conclusions.** The idea of reprogramming and diagnostics of system nodes along one line using ready-made industrial components (COTS) based on microcontrollers and development tools is proposed, which makes it possible to make their development cheaper. The proposed elements of the method of remote diagnostics, reprogramming and reconfiguration of individual nodes of the built-in system based on MC. A practical example of the implementation of the concepts discussed in the article, including its reconfiguration, is presented; a diagram of the device before and after its reconfiguration is given. The practical significance of this research lies in the possibility of building and configuring a system from many separate nodes based on microcontrollers.

Keywords: reconfigurability; reconfiguration; bootloader; in-system reprogramming; communication over single line; single line UART.

Вдовіченко Олександр Олександрович – асп., асист. каф. комп’ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Перепелицин Артем Євгенович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. комп’ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Дужий Вячеслав Ігорович – канд. техн. наук, доц. каф. комп’ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Желтухін Олександр Васильович – старш. викл. каф. комп’ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleksandr Vdovichenko – PhD student, assistant of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.vdovichenko@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0001-8695-1752.

Artem Perepelitsyn – PhD, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.perepelitsyn@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0002-5463-7889.

Viacheslav Duzhyi – PhD, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.duzhy@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0002-3383-1893.

Olexander Zheltukhin – Senior Lecturer of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.zheltukhin@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0001-7338-6256.