

УДК.62-23

д-р техн. наук, професор Кузавков В. В. ORCID: 0000-0002-0655-9759 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Мацаєнко А. М. ORCID: 0000-0003-1149-7318 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Погребняк С. В. ORCID: 0000-0002-7902-9847 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Бербер І. О. ORCID: 0009-0004-5136-942X (ІСЗЗІ НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”)

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІМПУЛЬСНОГО БЛОКА ЖИВЛЕННЯ В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ

Оскільки блок живлення є складовою частиною будь-якого радіоелектронного пристрою, для забезпечення високої якості та надійності його функціонування необхідна періодична перевірка його експлуатаційних характеристик та застосованих в ньому конструктивних рішень.

Відсутність або несвоєчасність процедур перевірки ставить під загрозу функціонування усього пристрою і робить користувача вразливим перед ймовірним настанням раптових відмов та подальшими потенційно неприємними ситуаціями.

Слід враховувати, що елементна база (якість виготовлення) блоків живлення не відрізняється від якості елементної бази усього пристрою, при цьому цей блок є посередником між мережею електроживлення (параметрами, характеристиками та станом мережі живлення) і основним пристроєм (технічним станом та адекватністю користувача при його застосуванні).

Отже, від ефективності та коректності функціонування блока живлення, стабільності його параметрів залежить довговічність основного обладнання. На випадок критичного стану устаткування саме блок живлення містить в собі запобіжник (систему автоматичного аварійного вимикання), при цьому спрацювання запобіжника не дозволяє визначити причину (джерело) критичного стану (мережа – блок живлення – основне устаткування – порушення правил експлуатації). Заміна запобіжника, або підміна блока живлення не гарантує кінцевого розв'язання задачі технічного діагностування. З огляду на постійно зростаючу складність та високу вартість сучасних радіоелектронних пристроїв (в тому числі і з елементами штучного інтелекту) критично важливим є питання своєчасного діагностування потенційних несправностей блоків живлення. Тому, розробка науково обґрунтованих підходів до визначення технічного стану саме блоків живлення та локалізації його несправностей є актуальною задачею.

Ключові слова: імпульсний блок живлення, діагностика, життєвий цикл, тестова послідовність, електролітичний конденсатор, безконтактний індукційний метод.

V. Kuzavkov, A. Matsayenko, S. Pohrebniak., I. Berber Methodology for determining the technical condition of the pulse power supply unit in dynamic mode

Since the power supply unit is an integral part of any electronic device, to ensure high quality and reliability of its operation, it is necessary to periodically check its operational characteristics and the structural solutions used in it.

The lack or untimely verification procedures jeopardizes the functioning of the entire device and leaves the user vulnerable to the likely onset of sudden failures and subsequent potentially unpleasant situations.

It should be borne in mind that the element base (workmanship) of the power supply units does not differ from the quality of the element base of the entire device, while this unit is an intermediary between the power supply network (parameters of the characteristics and state of the power supply network) and the main device (technical condition and adequacy of the user when using it).

Therefore, the durability of the main equipment depends on the efficiency and correctness of the functioning of the power supply, the stability of its parameters. In case of a critical state of the equipment, the power supply unit itself contains a fuse (automatic emergency shutdown system), while the operation of the fuse does not allow to determine the cause (source) of the critical state (network - power supply unit - main equipment - violation of operating rules). Replacing the fuse, or replacing the power supply does not guarantee the final solution to the problem of technical diagnostics. Given the ever-increasing complexity and high cost of modern electronic devices (including those with elements of artificial intelligence), the issue of timely diagnosis of potential power supply malfunctions is critically important. Therefore, the development of scientifically sound approaches to determining the technical condition of power supplies and localizing its faults is an urgent task.

Keywords: *pulsed power supply, diagnostics, life cycle, test sequence, electrolytic capacitor, non-contact induction method.*

Постановка задачі в загальному вигляді. Незалежно від конструктивного виконання блока живлення (зовнішній або вбудований) необхідно передбачити засоби перевірки його технічного стану. Це дозволить переконатися, що джерело живлення працює належним чином, а параметри вихідної напруги відповідають заявленим вимогам.

Вимоги для перевірки імпульсного блока живлення (ІБЖ) складаються, виходячи з параметрів пристрою і умов його застосування. На підставі цих вимог складається загальна стратегія тестування і тест-план. У такому тестовому плані повинні бути відображені всі допустимі експлуатаційні межі, температурні умови експлуатації, параметри вхідної та вихідної напруги, які вважаються нормальними і пристрій повинен працювати без збоїв і що всі необхідні запаси відповідають вимогам.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Сучасна радіоелектронна апаратура характеризується багатофункціональністю і складністю, яка обумовлена обсягом і характером розв'язуваних ними завдань. Дане обладнання містить у своєму складі один із найважливіших елементів – вторинні джерела живлення.

Аналіз розвитку радіоелектронного обладнання (РЕО) показує, що поліпшення тактико-технічних та експлуатаційних характеристик супроводжується схемним та конструктивним ускладненням основного обладнання з одночасним зниженням його надійності [1, 2].

Поліпшення ремонтпридатності та підвищення ефективності діагностичного забезпечення (під яким слід розуміти комплекс взаємозалежних правил, методів, алгоритмів та засобів, необхідних для здійснення діагностування РЕО на всіх етапах життєвого циклу) дозволяє досягти необхідних показників надійності [3, 4].

Метою статті є висвітлення складових розробленої методології визначення технічного стану елементів ІБЖ, в основу якої покладено безконтактний індукційний метод контролю технічного стану (ТС) радіоелектронних об'єктів (одним з яких є імпульсні вторинні джерела живлення (ІБЖ)). Складовими методології також виступають: алгоритм реалізації метода, алгоритм функціонування діагностичного пристрою, варіант практичної реалізації апаратної та програмної складової пристрою діагностування (контролю).

Актуальність завдань технічного діагностування ІБЖ може підтверджуватись наступними чисельними показниками:

відсоток ІБЖ від функціонального складу основного устаткування в сучасному РЕО становить до 10 % [5, 6];

значний час діагностування (до 70% від загального часу контролю ТЗ);

допустиме значення економічних витрат 10–15 % вартості основного устаткування РЕО і фактична вартість відновлювальних робіт з урахуванням доставки комплектуючих імпортного виробництва до 50 % вартості життєвого циклу виробу [7].

Виклад основного матеріалу. Сутність запропонованого підходу (методології) контролю технічного стану вторинних джерел живлення полягає у автоматичному (автоматизованому) аналізі діагностичного параметра, отриманого безконтактним методом. При чому, аналізу піддається реакція ІБЖ як САУ зі зворотнім зв'язком на динамічну зміну навантаження у вихідних колах чотиріполюсника.

Аналіз існуючих методів контролю технічного стану ІБЖ показує, що якість визначення технічного стану (ТС) цих виробів безпосередньо на об'єктах РЕО досить низька [8], внаслідок чого знижується коефіцієнт готовності РЕО. У процесі експлуатації ІБЖ функціонують за умов непередбачено динамічної зміни навантаження. При цьому контроль ТС здійснюється в статичному режимі, і позитивні результати контролю ТС в цьому випадку не гарантують працездатного стану ОК під час реальної роботи.

Безконтактний індукційний метод має високу чутливість і інформативність, оскільки умови для роботи складових елементів ІБЖ (САУ) у цьому випадку виявляються жорсткішими за звичайний режим функціонування (але в допустимих межах). У цьому випадку елементи,

які не піддаються контролю без вилучення зі схеми, спотворюють вид (параметри) перехідного процесу та змінюють його показники.

Динамічний контроль обраного об'єкта контролю можливо здійснювати у часовій та частотній області, а також із застосуванням статистичних методів обробки інформації. На практиці частотний метод контролю застосовується на етапі проектування ІБЖ, а застосування статистичного методу в місцях експлуатації неможливе через відсутність репрезентативної статистичної вибірки подібних зразків.

Використання часового контролю передбачає реєстрацію та аналіз параметрів ОК у часі, у тому числі із застосуванням засобів відображення первинної інформації.

Для того, щоб отримати задану достовірність контролю (особливо у місцях експлуатації), необхідно чітко визначити ознаки, які характеризують справний та несправний стан; вибрати узагальнені параметри, що однозначно визначають ці ознаки; знайти співвідношення між точністю вимірювань контрольованих параметрів (КП) та допусками на ці КП. Вирішення цих завдань можливе лише при використанні автоматизованих вимірювальних систем.

Широко відома практика використання ступінчастої функції (теорія автоматичного керування), яка подається на вхід об'єкта контролю. Результатом впливу такої функції на об'єкт є перехідний процес, в якому відображається інформація про реакцію системи на весь спектр частот. Сам перехідний процес визначається показниками якості (ПК), основними з яких є: час перехідного процесу τ_1 та τ_2 ; помилка в режимі $\alpha = 0,05U_{вст}$; N – число коливань протягом перехідного процесу, $\Delta U_{ст.}$ – коефіцієнт перерегулювання ($20\%–30\% U_{вст.}$), $t_{вст.}$ – час встановлення, T_o – період коливань (рис. 1).

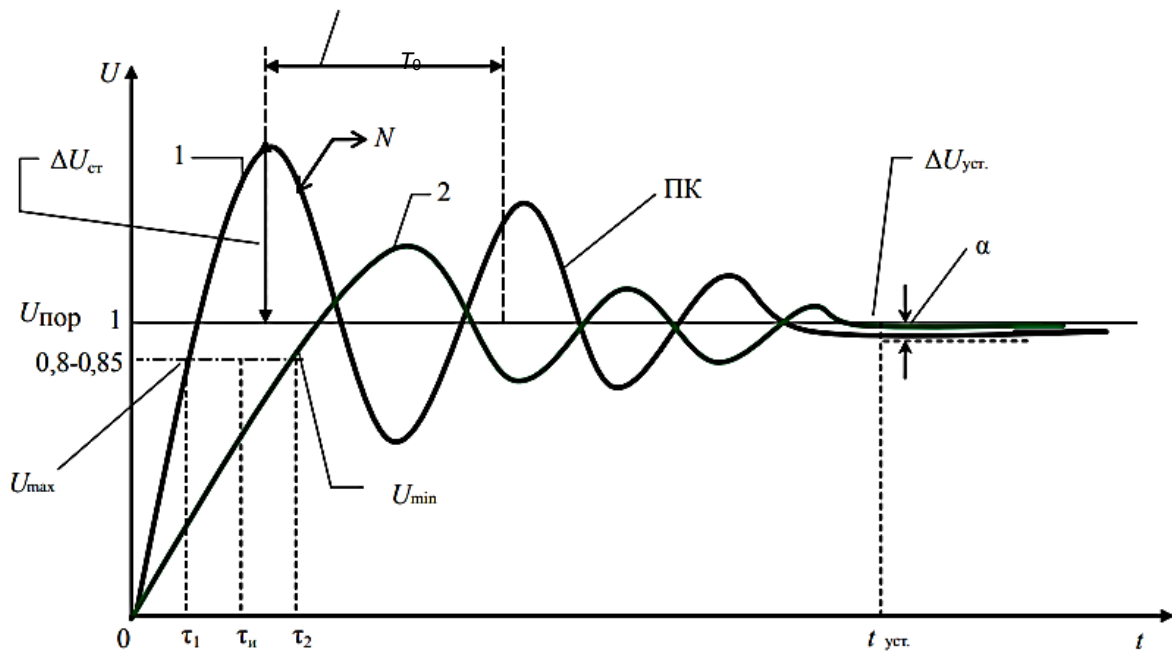


Рис. 1. Перехідний процес та його параметри

Оцінку стану ОК за одним із перелічених вище показників (чи його композиції) можна назвати прямими динамічними оцінками, оскільки вони характеризують динаміку безпосередньо за кривою перехідного процесу [9].

Однак, при контролі ТС сучасних ІБЖ слід враховувати низку особливостей їх побудови: джерело живлення є первинним елементом технічної системи та не повною мірою відповідає класичному чотириполоснику (відсутні входні кола);

сучасне вторинне джерело живлення є автоматичною системою управління (АСУ) замкнутого типу із зворотним зв'язком; у цій системі здійснюється автоматичний контроль основного параметра ІБЖ ($U_{\text{вих}}$). Відхилення цього параметра від норми призводить до необхідності внутрішнього регулювання.

Як зазначено у [2], перерегулювання вихідного значення напруги в 20–30 % може призвести до виходу з ладу основного обладнання та вихідних кіл самого ІБЖ (така напруга виходить за межі допустимих рівнів для радіоелектронного комплексу (РЕК) вихідних кіл ІБЖ, тому цього принципово не можна допустити).

Особлива увага на включення сучасних джерел живлення без навантаження ($P_n=0$), що є неприпустимим; інакше кажучи, при включенні джерела, P_n має бути у певних межах ($P_{\text{мін}} \dots P_{\text{макс}}$).

Використання первинної інформації для прийняття рішення про технічний стан ОК без попередньої обробки практично неможливо.

При використанні запропонованого методу вдається значно скоротити час, який витрачається на контроль ІБЖ. Це досягається, в першу чергу, використанням єдиного фізичного параметра діагностування.

Крім того, використання методу дозволяє оцінити ТС ОК без розриву зворотних зв'язків (використання особливостей функціонування ОК).

Мінімальна кількість контрольованих параметрів та уніфікація вхідних впливів у представленій методології дозволяє автоматизувати процес контролю технічного стану та процес прийняття рішення.

З практичної точки, постає задача створення пристрою (підсистему контролю ТС обраного ОК) який би задовольняв наступним вимогам:

функціональність – здатність забезпечити необхідний рівень виконання передбачених завдань;

точність – чисельні значення діагностичних параметрів повинні вимірюватись з похибками, які не перевищують задані граничні показники;

надійність – здатність пристрою до безвідмовної роботи протягом заданого часу, обумовленого часом виконання поставленого завдання;

економічна доцільність створення такого пристрою передбачає використання відносно дешевих комплектуючих та їх невелику кількість.

Належний рівень надійності пристрою контролю в цілому забезпечується застосуванням комплектуючих компонентів високого класу точності (з мінімальними допусками), кратним резервуванням експлуатаційних номіналів (за температурою, потужністю та ін.) в сукупності з мінімальною кількістю РЕК.

Функціонування пристрою визначення ТС, обраного ОК, забезпечується апаратною та програмною складовою. До складу апаратної частини входить пристрій формування тестової послідовності, блок керування, засоби отримання та обробки діагностичної інформації.

Структурна схема блоку формування тестової послідовності наведена на рисунку 2, на якому позначено: блок керуваного навантаження (БЛКН), датчик діагностичної інформації (ДДІ), об'єкт контролю (ОК), блок керування (БЛКр), автономна автоматизована система діагностування (ААСД).

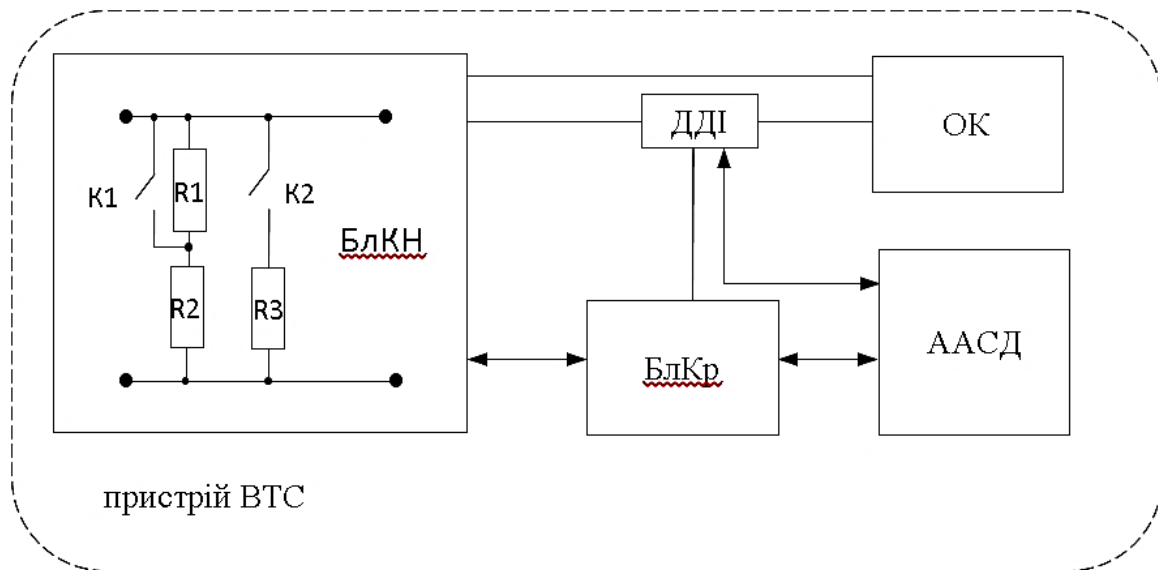


Рис. 2. Структурна схема підсистеми визначення технічного стану

Номинальні значення елементів $R1 - R3$, отримані виходячи з технічних характеристик ІБЖ, який підлягає перевірці. Оскільки вмикання обраного ОК без навантаження неприпустимо, то первинне вмикання (вихід імпульсного блоку живлення на робочий режим) здійснюється при номінальному значенні навантаження (вихідного струму). Подальше перемикавання навантаження відповідно до обраної форми тестового впливу відбувається шляхом комутації електронними ключами (елементами $K1, K2$).

Значення часових параметрів тестового сигналу (управління ключовими елементами) здійснюється мікроконтролером зі складу блоку керування. Початок та завершення тестової послідовності (інтервал часу реєстрації діагностичного параметра) здійснюється автоматично.

Відповідно до представленої методології (частиною якої є безконтактний індукційний метод) отримання діагностичної інформації, в пристрої використано безконтактний індукційний датчик (вторинна обмотка спеціалізованого трансформатора струму). Інформативність (адекватність) отриманих діагностичних даних забезпечується відомим співвідношенням (1):

$$\tau = 3RC, \quad (1)$$

де τ – тривалість перехідного процесу, яка визначається параметрами RC кола;

R – опір ділянки кола;

C – сумарна ємність цієї ділянки.

Вважаючи, що величина R є незмінною, можливо стверджувати, що зміна параметрів перехідного процесу обумовлена зміною параметрів складових РЕК ОК.

Проведений аналіз будови ІБЖ, дозволяє стверджувати, що параметри перехідного процесу під впливом навантаження, в першу чергу, визначаються технічним станом електролітичного конденсатора у вихідному фільтрі. За результатами проведеного аналізу цей радіоелектронний компонент визнано низьконадійним.

Таким чином, після обробки діагностичного сигналу (перетворення в цифрову форму та статистичну обробку) отримуємо енергетичний паспорт об'єкта контролю на момент перевірки (з урахуванням часу експлуатації). Прийняття рішення про фактичний технічний стан ОК здійснюється в режимі реального часу системою АСД (автоматична система діагностики) шляхом порівняння інформації (представленої у вигляді гістограми) з еталонним паспортом ОК.

Практична реалізація блоку керування (БлКр) виконана на мікроконтролері *ATmega328* корпорації *MICROCHIP*, що задовольняє вимоги за швидкістю та енергоспоживанням. Мікроконтролери *AVR* мають розвинену систему команд (до 133 інструкцій), високу продуктивність (до 1 MIPS/МГц), можливість внутрішньосхемного програмування.

На рис. 3 представлена принципова схема тестової установки. За формування часових інтервалів та керуючих імпульсів (згідно з алгоритмом) відповідає мікроконтролер *ATmega328*.

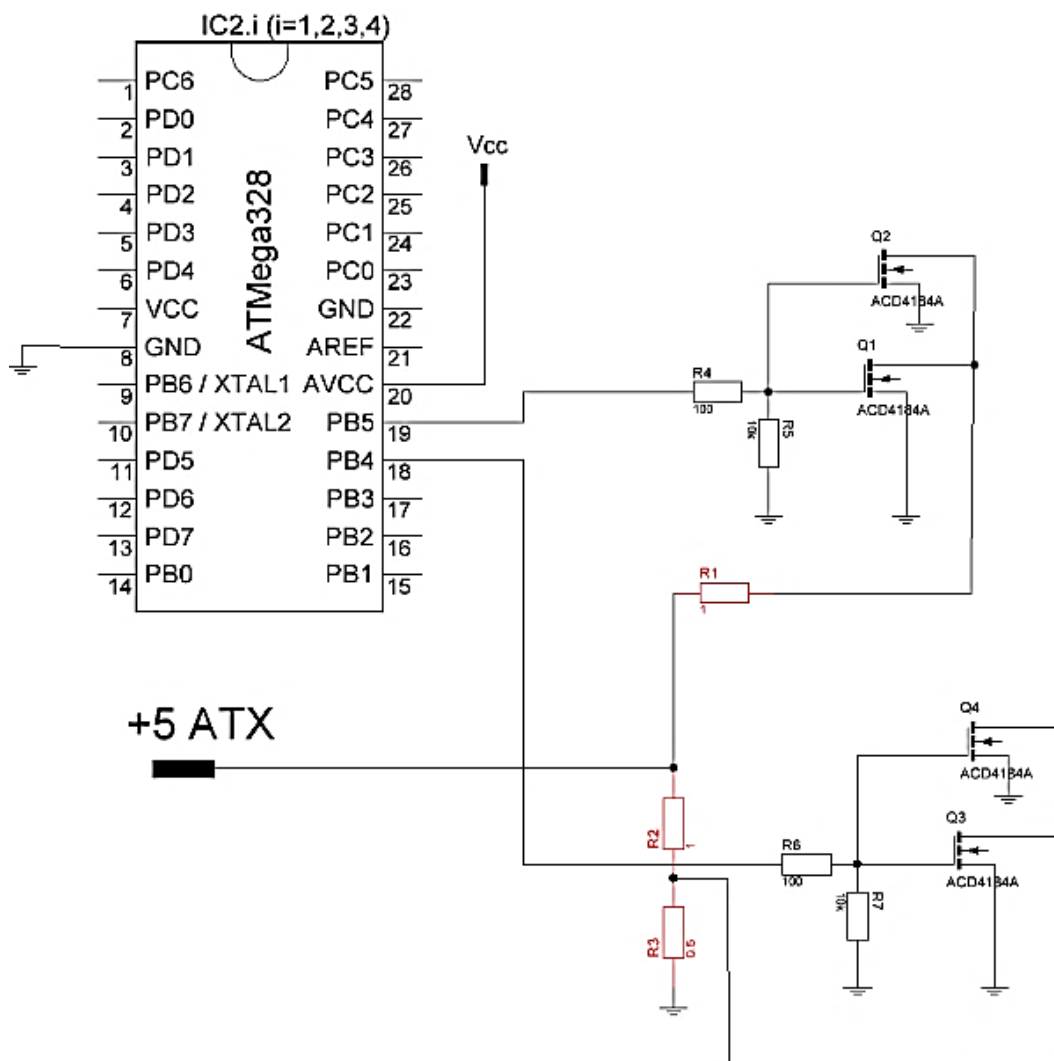


Рис. 3. Принципова схема тестової установки підсистеми визначення технічного стану на базі мікроконтролера *ATmega328*

В якості силових ключів використані пари MOSFET транзисторів $Q1$, $Q2$ і $Q3$, $Q4$ типу *ACD4184A*.

Резистори $R1$, $R2$, $R3$ забезпечують потрібні для експерименту значення струму (навантаження блока живлення, що підлягає дослідженню). Потужність розсіювання цих резисторів обрана 10 Вт. Під час експерименту температура їх нагрівання не перевищувала 40 °С.

Значення резисторів $R4$, $R6$ забезпечують надійне «відкриття» MOSFET транзисторів. Резистори $R5$, $R7$ застосовано для уникнення впливу завад на роботу ключів. Живлення мікроконтролера здійснюється від окремого стабілізованого джерела живлення (напруга 5В).

Програмна складова пристрою визначення технічного стану створена за допомогою інтегрованого середовища розробки *AVR Studio*.

На рис. 4 представлено алгоритм роботи мікроконтролера, завдання якого полягає в формуванні керуючих імпульсів на пари силових транзисторів (типу *ACD4184A*).

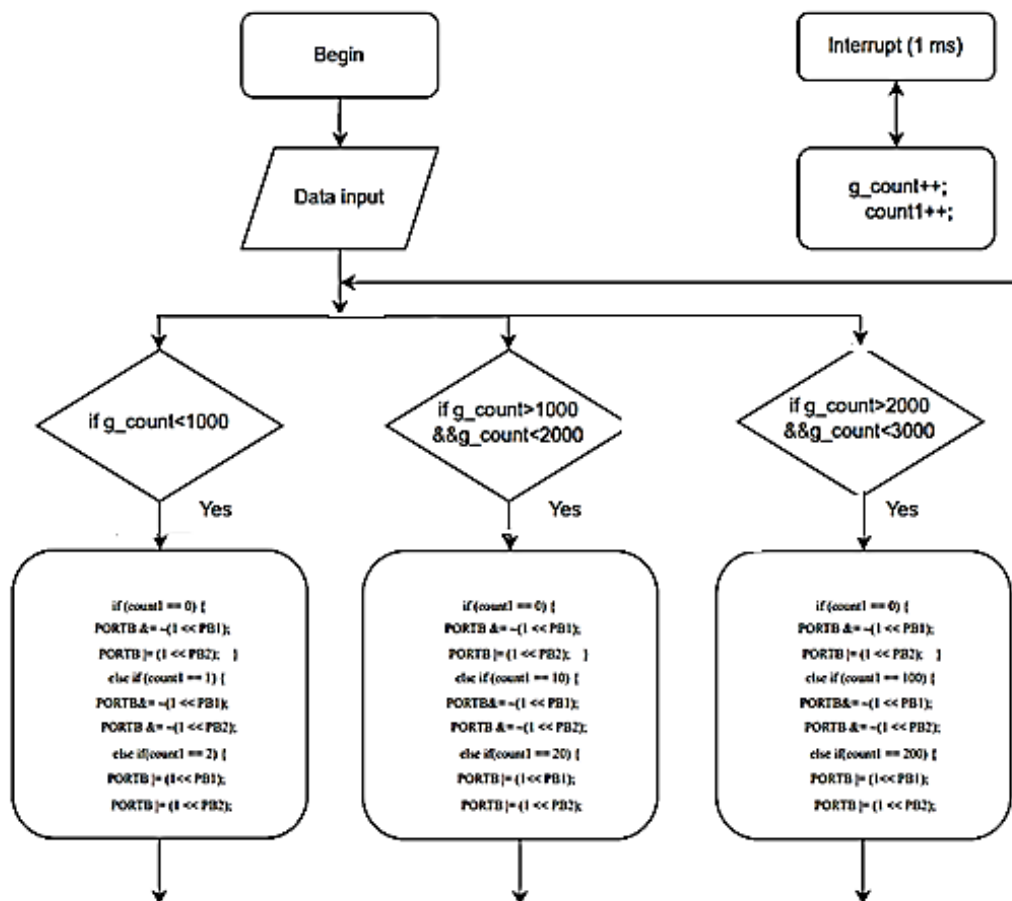


Рис. 4. Блок-схема алгоритму функціонування мікроконтролера *ATMega328*

Саме алгоритм формування керуючих сигналів забезпечує необхідну тривалість тестової послідовності та час між перемикаваннями.

Під час проведення досліджень довжина тестової послідовності становила 3 секунди. При цьому, всередині тестової послідовності інтервал комутації складав 1 мс, 10 мс та 100 мс відповідно. Зміна часу перемикавання дозволила виявити умови отримання діагностичного сигналу з більшою інформативністю (10 мс).

Забезпечення необхідних часових інтервалів виконано з застосуванням переривання мікроконтролера за часом на таймері T1, в обробнику переривань якого, встановлюються значення змінних *g_count*, *count1*.

В основному циклі здійснюється аналіз поточних значень цих змінних, а в заданий момент часу (згідно алгоритму) видаються сигнали комутації на виводи мікроконтролера PB5 і PB4, та відповідні затвори пар силових транзисторів.

Практично виготовлений пристрій за схемою на рис. 3 (та алгоритмом функціонування рис. 4) дозволяє виявити технічний стан електrolітичних конденсаторів блока живлення у вхідних та вихідних колах фільтрації.

Висновки

Запропонований у рамках методології підхід до діагностування низьконадійних елементів зі складу імпульсних джерел живлення може бути використано для визначення

стану будь яких блоків живлення сучасного РЕО, які містять в собі елементи кіл зворотного зв'язку. Розроблена схема пристрою контролю (алгоритм функціонування, програмна та апаратна складова) дозволяє оцінити технічний стан електролітичних конденсаторів зі складу ІБЖ без їх демонтажу, що принципово відрізняє її від існуючих на сьогодні систем контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коренівська О. Л., Бенедицький Б. В. Надійність експлуатація та ремонт радіоелектронної та телекомунікаційної техніки: навч. посіб. Житомирська політехніка, 2020. 181 с.
2. Бобало Ю. Я. Аналіз методів оцінювання безвідмовності систем сумісно працюючих компонентів електронних пристроїв / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, О. В. Лазько // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2007. № 7 (26). С. 212–214.
3. ДСТУ ІЕС 60706-2:2008 (ІЕС 60706-2:2006, IDT) Ремонтопридатність устаткування. Частина 2. Вимоги до ремонтпридатності та дослідження на етапі проектування та конструювання. 45 с.
4. Єманов В. В. Досвід функціонування системи технічного забезпечення силових структур провідних країн світу в умовах кризових ситуацій: Честь і закон. № 2 (85). 2023. С. 80–85.
5. Піддубний В. О., Товкач І. О. Елементна база радіоелектронної апаратури: Пасивні радіокомпоненти. В 4 ч. Ч. 1.: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 98 с.
6. Панфілов І. П., Савицька М. П., Флейта Ю. В. Компонентна база радіоелектронної апаратури: навч. посіб. Модуль 1. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2013. 180 с.
7. Толстова А. В., Огненна Х. В. Теоретичні аспекти формування механізму інноваційного розвитку промислового підприємства. Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. 2016. Вип. 21. С. 106–110. URL: <http://www.vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2016/21-2016/24.pdf>.
8. K. Khan, R. Verma, A. Roy Review of High Voltage Pulsed Power Supplies and Power Electronics in Pulse Power Generation /Power-Research-A-Journal-of-CPRI URL: <https://www.researchgate.net/journal/Power-Research-A-Journal-of-CPRI-0973>; <http://dx.doi.org/10.33686/pwj.v19i2.1140>.
9. Givi H., Farjah E. and Ghanbari T. A comprehensive monitoring system for online fault diagnosis and aging detection of non-isolated dc–dc converters' components / IEEE Trans. Power Electron. vol. 34, № 7. 2019. Pp. 6858–6875.