МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОСОЛІНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР РОМАНОВИЧ

УДК 004.925.4

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Науково-дослідному інституті інтелектуальних комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент **Кочан Володимир Володимирович,** Тернопільський національний економічний університет, професор кафедри інформаційно – обчислювальних систем і управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Мичуда Зиновій Романович**, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри "Комп'ютеризованих систем автоматики"

кандидат технічних наук, доцент **Чешун Віктор Миколайович,** Хмельницький національний університет, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

Захист відбудеться «2» липня 2016 р. о 12^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.082.02 у Тернопільському національному економічному університеті за адресою: 46020, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11а (корпус 11, зал засідань вченої ради).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного економічного університету за адресою: 46020, м. Тернопіль, вул. Бережанська, 4

Автореферат розісланий 01 червня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доцент Яцків В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Вбудовані комп'ютерні системи з автономним живленням використовуються все ширше. Їх компоненти, виготовлені за КМОН технологією, мають високу швидкодію при малій споживаній енергії. Але все таки залишається актуальною проблема продовження часу їх автономної роботи.

Очевидним методом продовження часу автономної роботи є збільшення енергоємності джерел живлення, але він вимагає ґрунтовних фундаментальних досліджень (створення нових матеріалів, їх випробування), тому дуже дорогий. Другий шлях – вдосконалення КМОН технології, має ті ж недоліки та придатний лише для нових виробів, так само, як і третій шлях – оптимізація апаратного забезпечення. Перспективніший для України четвертий шлях – оптимізація програмного забезпечення за енергоспоживанням. Він може застосовуватися у всіх випадках, значно дешевший, придатний як для нових, так і старих систем. Однак обов'язковою умовою оптимізації енергоспоживання ПЗ є достатньо точна математична модель енергоспоживання процесорного ядра. Така модель повинна базуватися на результатах експериментальних досліджень. Але існуючі моделі мають низьку точність. Однією з причин є потреба використання обладнання, що має необхідну точність саме в умовах вимірювання енергоспоживання КМОН мікросхем, де струм споживається у моменти зміни логічного стану елементів.

Слід зауважити, що на сьогодні за КМОН технологією виготовляють різні пристрої – мікропроцесори, мікроконтролери, спеціалізовані мікросхеми, пам'ять, логічні елементи, програмовані логічні матриці. Характер їх енергоспоживання визначає лише КМОН технологія, а запропоновані у даній дисертації методи і засоби придатні для всіх цих пристроїв. Тому в подальшому ці пристрої будемо називати мікроконтролерами та позначати МК.

Питанням енергоспоживання процесора для виконання інструкції займалися V.Tiwari, S.Malik, A.Wolfe, Mike Tien-Chien Lee, J.Russell, M.Jacome, J. Figueras, Th. Laopoulos, P. Neofotistos, C. Kosmatopoulos, S. Nikolaidis, А. Боровий.

Відомі методи вимірювання струму, потужності, енергії виконаних за КМОН технологією пристроїв мають велику похибку, бо не враховують характер їх енергоспоживання. Тому розроблення нових, точних методів і засобів виміру енергоспоживання КМОН мікросхем є цілком актуальною задачею.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася згідно спільних науково-дослідних проектів: Україно-Італійського проекту № М/79-2004 "Розробка Web-базованої вимірювальної системи з розподіленим інтелектом", що виконувався в рамках Виконавчої програми співробітництва в галузі освіти, культури та науки на 2004-2006 роки (№ ДР 0104U006975) та Україно-Молдовського проекту "Дистрибутивні сенсорні мережі з реконфігурацією обчислювальних вузлів" (№ ДР 0115U004816), виконаних на базі Тернопільського національного економічного університету.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення інформаційно-вимірювальної системи енергоспоживання мікроконтролерів та інших імпульсних споживачів, яка має підвищену точність і завадостійкість, а також дає змогу порівнювати результати вимірювання середнього та миттєвого енергоспоживання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1) провести аналіз відомих методів і засобів вимірювання струму та потужності при споживанні енергії МК;

2) запропонувати методи вимірювання середнього енергоспоживання МК;

3) розробити методи та засоби оцінки методичних похибок запропонованих методів вимірювання середнього енергоспоживання МК, а також їх завадостійкості, та провести оцінку цих похибок та завадостійкості;

4) розробити архітектуру інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) енергоспоживання МК;

5) розробити апаратне та програмне забезпечення ІВС енергоспоживання МК та провести аналіз її похибок.

Об'єкт дослідження – процес споживання енергії мікроконтролером при виконанні інструкцій, команд, програм та їх фрагментів.

Предмет дослідження – методи і засоби точного та завадостійкого вимірювання та дослідження середнього енергоспоживання мікроконтролерів за допомогою інформаційно-вимірювальної системи.

Методи дослідження. Методи аналізу та синтезу електричних кіл, теорії похибок, імітаційного моделювання, функціонального та параметричного синтезу.

Наукова новизна. Вперше:

1. Запропоновано метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, який, на відміну від існуючих, за рахунок живлення схеми від стабілізатора струму, що відповідно налаштовується перед вимірюванням, та використанню метода двохтактного інтегрування, забезпечує нормальний (штатний) режим роботи мікроконтролера та високу точність вимірювання його середнього енергоспоживання, а також високу точність порівняння результатів вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання мікроконтролерів.

2. Запропоновано метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, який, на відміну від попереднього, за рахунок автоматичного налаштування відхилень миттєвих значень напруги на мікроконтролері шляхом ітераційної узгодженої зміни ємності конденсатора в колі живлення мікроконтролерів та допусків на зміну напруги на ньому, дає змогу обчислити результат вимірювання енергоспоживання лише за результатами вимірювання прецизійних амперметра і вольтметра постійного струму, що забезпечує подальше підвищення точності вимірювань та можливість автоматизації процесу дослідження середнього енергоспоживання мікроконтролерів.

3. Досліджено методичні похибки пропонованих методів вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів шляхом математичного моделювання в середовищі LabVIEW, яке показало, що, при відповідному виборі елементів кола живлення мікроконтролерів та тактової частоти при їх дослідженні, цими похибками можна нехтувати.

4. Запропоновано метод забезпечення завадостійкості вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи, який, за рахунок встановлення тривалості циклу вимірювання згідно одночасного дотримання критеріїв перевищення часу вимірювання мінімально допустимого значення, кратності його періоду мережі, а також не перевищення відхиленнями напруги на

мікроконтролері та її інтегралом допустимих значень за час вимірювання, забезпечує суттєве зменшення впливу завад.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні:

1. Моделі нелінійного споживання струму мікроконтролером для дослідження методичних похибок запропонованих методів вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів.

2. Віртуального стенда дослідження методичних похибок схем вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів на основі середовища розробки та виконання програм LabVIEW.

3. Архітектури інформаційно-вимірювальної системи, що забезпечує вимірювання як миттєвого, так і середнього енергоспоживання мікроконтролерів, а також структурних схем її апаратних компонентів та алгоритмів програмного забезпечення.

Теоретичні та практичні результати роботи впроваджені у ТОВ "Елекс" для оцінки енергоспоживання програмного забезпечення (при розробленні аплікацій для мобільних пристроїв під у'правлінням операційних систем iOS та Android) та апаратного забезпечення на базі програмованих логічних матриць (аплікації для вбудованих систем), фірмі «Сайпрес Семікондактор» для оцінки енергоспоживання процесорних систем на кристалі PsoC1,3,4,4-BLE,5 (CY8C28, CY8C38, CY8C41/42, CY8C41/42-BLE, CY8C55) та у ТОВ «Світлоцентр» для оцінки енергоспоживання програмного забезпечення контролерів заряду акумуляторних блоків (SNT 32F 103) в системах автономного енергозабезпечення, а також у навчальний процес при викладанні дисциплін "Мікропроцесорні системи" та "Електроніка і електротехніка" з напряму 6.050101 "Комп'ютерні науки".

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні дослідження, розробка методів, структур та алгоритмічного забезпечення виконані автором самостійно. Аналіз результатів досліджень, розроблення окремих схемних рішень, програмного забезпечення і впровадження результатів дисертації проведені у співавторстві згідно з наведеним списком праць. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [1, 2, 4] – архітектура дистрибутивної ІВС; [3] – архітектура дистрибутивної ІВС, що базується на мережі Інтернет; [5] – ПЗ, що дозволяє автоматизувати підготовку даних для навчання нейронних мереж (НМ); [6, 7, 8, 10, 11] – метод вимірювання середньої енергії споживання МК; [12, 13] – методика дослідження методичної похибки; [15] – методика дослідження методичних похибок вимірювання середнього енергоспоживання МК.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації представлено та обговорено на 10 конференціях: 3-му, 4-му і 5-му міжнародному симпозіумі IEEE "Інтелектуальні засоби збору даних і сучасні обчислювальні системи: розробка та застосування" (Софія, Болгарія, 2005р.; Дортмунд, Німеччина, 2007р., Ренде (Козенца), Італія, 2009); міжнародних конференціях "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії" (Львів-Славсько, Україна, 2014р.; 2016р.); III, IV, V Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів "Сучасні комп'ютерні інформаційні технології" (Тернопіль, Україна, 2013р.; 2014р.; 2015 р.); 7-й та 8-й міжнародній конференції IEEE «Інтелектуальні засоби збору даних і сучасні обчислювальні

системи: розробка та застосування» (Берлін, Німеччина, 2013 р.; Варшава, Польща, 2015 р.).

Публікації. За результатами проведених наукових досліджень опубліковано 16 друкованих робіт, серед них 4 статті у фахових виданнях, 1 патент України, з них одна одноосібна, одна стаття у науково-теоретичному закордонному журналі, 10 доповідей і тез в збірниках вітчизняних та міжнародних наукових конференцій, з них одна одноосібна. Шість публікацій індексовано у науково-метричних базах Web of Scince і SCOPUS.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 6 додатків і списку 133 використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 142 сторінки, із них 110 сторінок основного тексту, що містить 33 рисунки. Додатки – на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету, завдання та методи дослідження, визначено наукову новизну, практичне значення та особистий внесок автора в отримані результати, подано відомості про їх апробацію та впровадження.

У першому розділі показано характер споживання струму МК та перелічені вимоги до кола його живлення, проведено аналіз методів і засобів вимірювання його енергоспоживання. Показано, що методи вимірювання середнього струму споживання МК мають значні похибки від неконтрольованого обміну енергією між конденсатором в колі живлення МК або внесеної паразитної індуктивності.

В результаті аналізу відомих методів вимірювання миттєвої потужності та енергії споживання МК встановлено, що найкращим є метод, апаратна реалізація якого передбачає: 1) використання конденсатора в колі живлення МК як перетворювача струм-напруга; 2) живлення МК від стабілізатора струму.

При цьому вимірювання ведуть два канали цифрового осцилографа. Високочастотний еквівалент стабілітрона (на операційному підсилювачі) захищає МК від перевищення напругою на ньому допустимої. Напруга спрацювання операційного підсилювача задається стабілізатором напруги.

Перевагами відомого методу є:

1. МК працює у штатному режимі – у колі живлення МК є конденсатор;
2. Баланс струмів живлення МК можна записати за першим законом Кірхгофа;
3. Необхідні для роботи зміни напруги на МК не перевищують 50 мВ;
4. МК захищено від перевищення напруги в колі живлення, напруга спрацювання захисту МК задається вихідною напругою стабілізатора напруги;
5. 8-ми бітний цифровий осцилограф працює у диференціальному режимі (похибка дискретності 0,004%), при цьому завади загального виду малі;
6. Наявність методики корекції похибок всіх елементів вимірювальних каналів, похибка результату обчислення миттєвої потужності споживання МК < 0,75%.

На основі відомого методу була розроблена ІВС миттєвого енергоспоживання та нейромережевого прогнозування енергії виконання тих

інструкцій, які не були досліджені експериментально. Однак цій ІВС притаманні недоліки: низька завадостійкість та накопичення похибки при дослідженні енергоспоживання набору інструкцій (програми). З іншої сторони високу завадостійкість мають відомі методи вимірювання середнього енергоспоживання. Однак, як було показано вище, їх застосування до вимірювання струму споживання МК приводило до значних похибок. Тому автором запропоновано розробити нові методи вимірювання енергії споживання МК, які забезпечують високу точність та завадостійкість, а також створити ІВС, що поєднує переваги методів вимірювання миттєвої та середньої енергії.

У другому розділі проведено аналіз процесу вимірювання середнього енергоспоживання МК та запропоновано методи його вимірювання, які характеризуються зменшеною похибкою порівняння результатів вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання.

У схемі, що реалізує згаданий найкращий метод вимірювання миттєвого енергоспоживання, при вимірюванні середнього енергоспоживання можна записати баланс енергоспоживання МК (за першим законом Кірхгофа)

$$E_{REFI} = E_{MK} \pm E_C + E_R, \tag{1}$$

де E_{REFI} – енергія, генерована стабілізатором струму живлення МК; E_{MK} – енергія, спожита МК; $\pm E_C$ – енергія конденсатора С в колі живлення МК, яка або відводиться з кола живлення, або туди поступає; E_R – енергія, відведена еквівалентом стабілітрона, під час захисту МК.

При цьому енергію, накопичену або віддану конденсатором С, можна визначити як

$$E_C = (C \cdot U_C^2)/2, \tag{2}$$

а її зміну ΔE_C – як

$$\Delta E_C = (C \cdot \Delta U_C^2)/2, \tag{3}$$

де U_C, ΔU_C – напруга на конденсаторі С та її зміна.

Автором запропоновано проаналізувати закінчення процесу вимірювання середнього енергоспоживання МК коли зміна напруги на конденсаторі С прямує до нуля, тобто

$$\Delta U_C \to 0, \tag{4}$$

то $\Delta E_C \to 0$ і енергія С не впливає на результат вимірювання. Тоді

$$E_{REFI} = E_{MK} + E_R. \tag{5}$$

Імпульсну енергію можна визначити як $E = \int_{t=0}^{T} u \cdot i \cdot dt$ (де u, i – миттєві значення напруги та струму живлення МК; T – час вимірювання), а, при умові

$$\int_0^T (u - U_{REF})dt \to 0, \tag{6}$$

та врахувавши, що поточний струм $i_{REF} = I_{REF} = const$ (його формує стабілізатор струму СС), можна провести наступні перетворення

$$E_{REF} = \int_{t=0}^{T} u_{REF} \cdot i_{REF} \cdot dt \approx U_{REF} \int_{t=0}^{T} i_{REF} \cdot dt = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T. \qquad (7)$$

Енергію E_R, врахувавши, що відхилення u від U_{REF} малі (не більше 1%), тобто $u \approx U_{REF}$, та при умові виконання (6) можна визначити як

$$E_R = \int_{t=0}^{T} u \cdot i_R \cdot dt \approx \int_{t=0}^{T} U_{REF} \frac{u_R}{R} dt = \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^{T} u_R dt. \qquad (8)$$

Підставивши (7) та (8) у (5) та перетворивши, отримаємо

$$E_{MK} = E_{REFI} - E_R \approx U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T - \frac{U_{REF}}{R} \int_0^T u_R dt \quad . \qquad (9)$$

Розроблено узагальнену структуру системи вимірювання середнього енергоспоживання МК, яка на відміну від структурної схеми за відомим методом вимірювання миттєвого енергоспоживання, містить підсистему регулювання струму РСС стабілізатора струму СС (рис. 1), канал ВИМ вимірювання інтегралу спаду напруги на R та компаратор КП, що фіксує виконання умови (4).

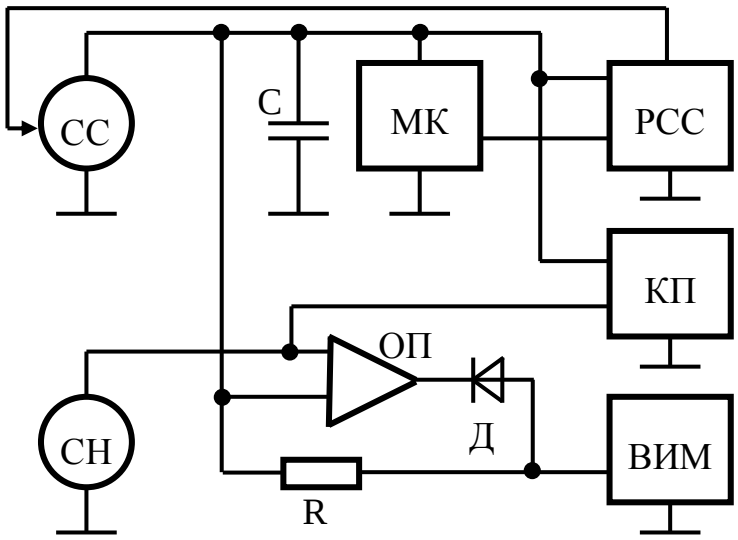

Рис. 1. Структура системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

МК подає на РСС та ВИМ сигнал початку виконання досліджуваних інструкцій. РСС інтегрує відхилення напруги живлення МК від напруги СН (остання рівна номінальній напрузі живлення МК). Якщо абсолютне значення інтегралу перевищує допустиме відхилення, то РСС змінює струм СС, щоб наблизити абсолютне значення інтегралу до нуля. Якщо абсолютне значення цього інтегралу не перевищує допустиме значення (умова (6) виконана), то фіксується результат вимірювання каналу ВИМ (входить у (9)). Значення напруги СН, струму СС та опору резистора R, що входять у (9), визначають прецизійним тестером.

Час вимірювання T визначається спів паданням наступних обмежень:

1. (4) – зміна напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не повинна перевищувати допустиме значення, за цим стежить компаратор КП;
2. (6) – зміна інтеграла напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не повинна перевищувати допустиме значення, за цим стежить РСС.

Крім того, до часу вимірювання T ставляться такі вимоги:

3. T не повинен бути меншим деякого заданого значення T_{MIN} ;
4. T також не повинен бути більшим деякого заданого значення T_{MAX} ;
5. T має бути кратним багатократному повторенню досліджуваної інструкції,

програми в цілому або її фрагмента;

6. T повинен бути кратним періоду 0,02с мережі 50 Гц для пригнічення завад при використанні АЦП двохтактного інтегрування.

Узагальненій структурі (див рис. 1) відповідає запропонована структурна схема системи (рис. 2), де показано підключення цифрових вольтметра V та амперметра А. Ключ К зменшує завади для амперметра А. E_{MK} визначає обчислювальний пристрій згідно (9).

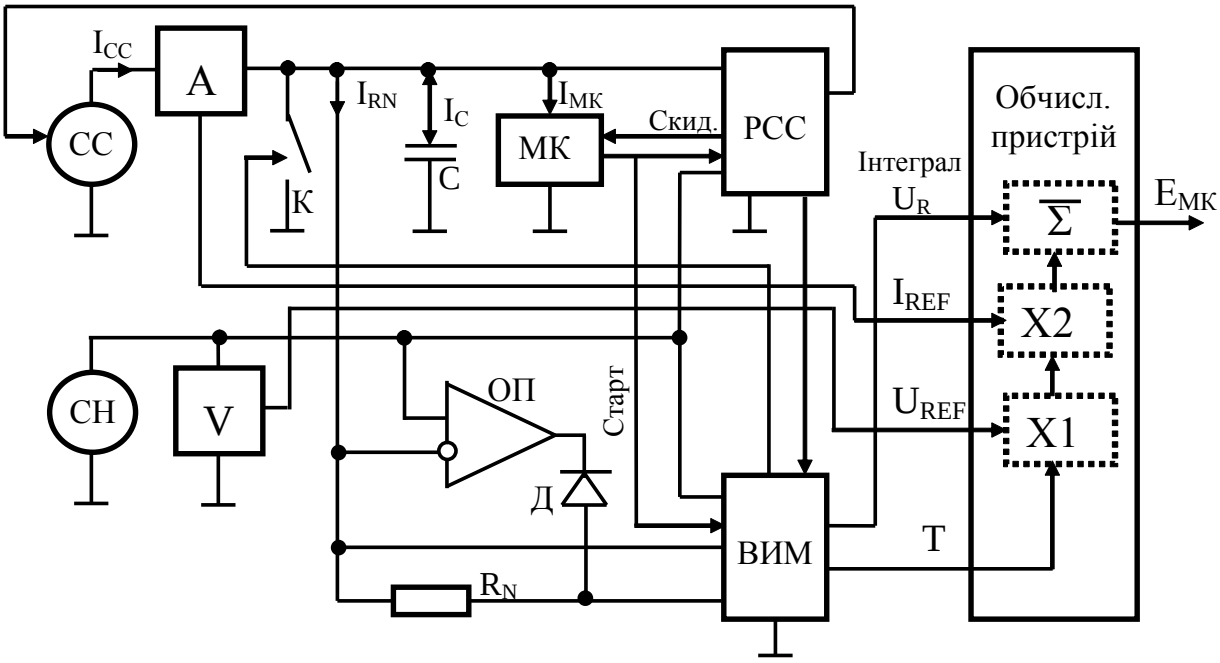

Рис. 2. Структурна схема системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

Для підвищення точності системи (див. рис. 2) запропоновано зменшити у (9) вплив похибки АЦП двохтактного інтегрування каналу ВИМ, для чого слід виконати умову

$$U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T >> \frac{U_{REF}}{R} \int_0^T u_R dt . \qquad (10)$$

Для цього схема захисту має спрацьовувати порівняно рідко та вмикатися на короткий час. Але це, в свою чергу вимагає підбору ємності конденсатора С і тому можливий випадок, коли зміни напруги в колі живлення досліджуваного МК будуть надто великі.

З метою покращення схеми (див. рис. 2) запропоновано метод автоматичного вимірювання середнього енергоспоживання МК, який реалізує структурна схема рис. 3, де використано семи-розрядний магазин конденсаторів Маг.С. Контроль зміни напруги на МК виконують компаратори КП1 і КП2, пороги спрацювання яких задають цифро-аналогові перетворювачі ЦАП 1 і ЦАП 2. В детальній структурній схемі показано реалізацію компараторів КП1 і КП2, а також кола керування стабілізатором струму СС (рис. 4). Компаратори КП1 і КП2 будуються на базі операційних підсилювачах ОП1 та ОП2, на виході яких ввімкнено фіксатори Фікс.1 та Фікс.2.

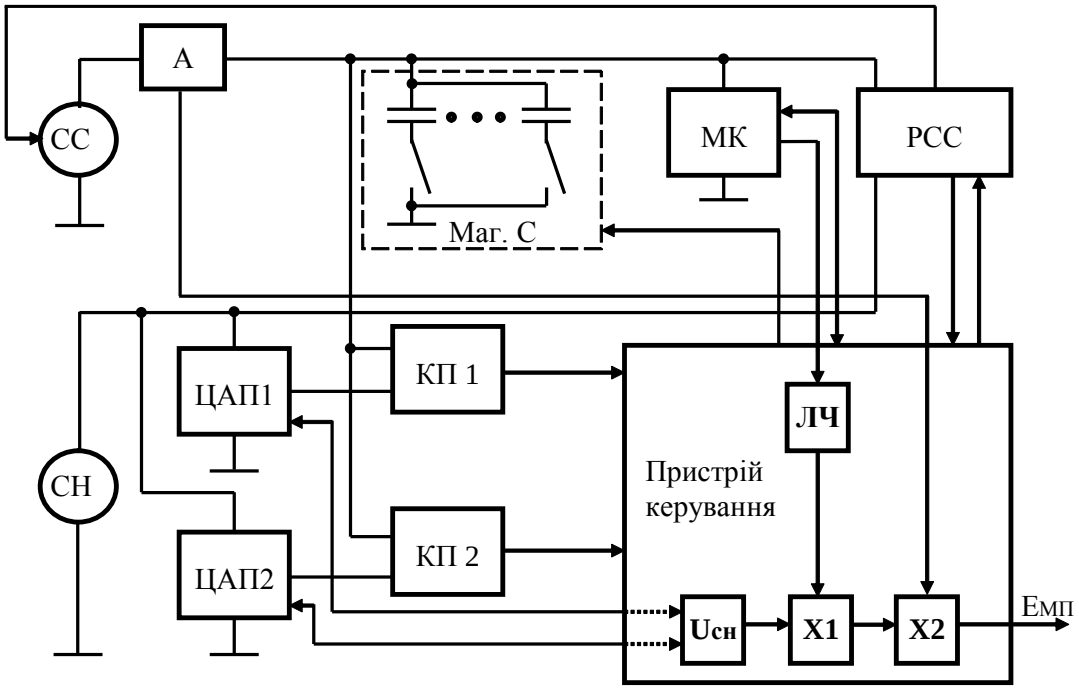

Рис. 3. Структурна схема автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

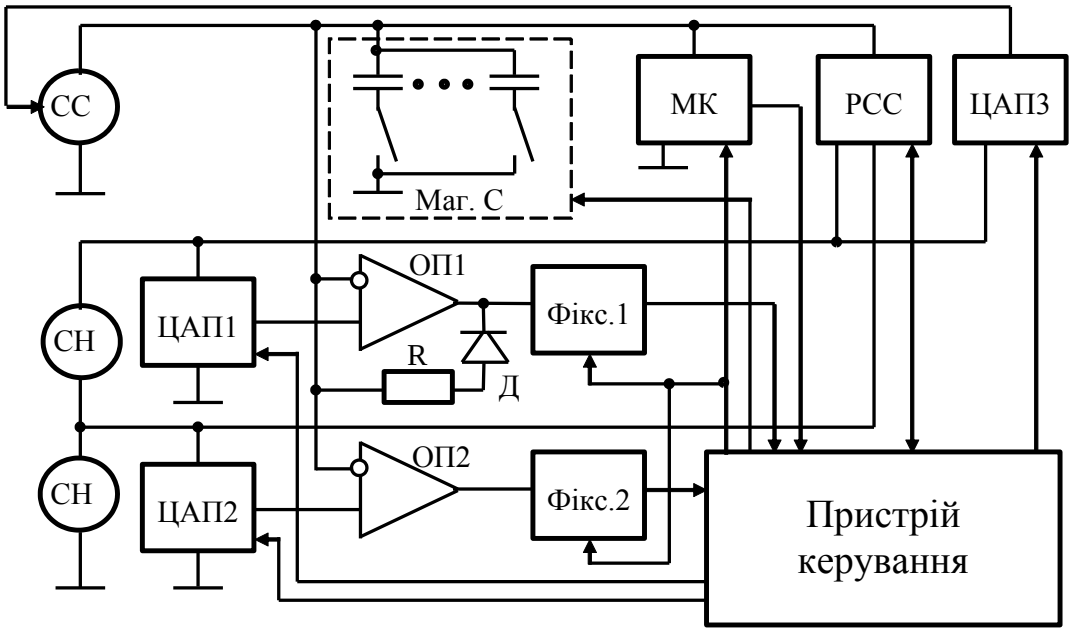

Рис. 4. Реалізація компараторів КП1 і КП2 та керування стабілізатором струму

Останні необхідні для того, щоби зафіксувати перевищення напруги на конденсаторі С в колі живлення МК з меж допустимого значення за весь час вимірювання T. Якщо Фікс.1 та/або Фікс.2 спрацювали, то вимірювання не зараховується, тобто значення струму СС, ємності Маг.С і порогів спрацювання КП1 і КП2 вибрані не оптимально. Крім того, на рис. 4 показана схема захисту МК від перевищення допустимої напруги (резистор R і діод Д).

Таким чином, із схем рис. 3, 4 видно, що при їх роботі необхідно одночасно

та узгоджено міняти струм СС, ємність Маг.С і пороги спрацювання КП1 і КП2. Для цього розроблено алгоритм аналізу даних і прийняття рішень (рис. 5) пристроєм керування (див. рис. 5), реалізований сукупністю наступних кроків:

1. Аналіз виконання умови (6). Якщо інтеграл зміни напруги живлення МК за час вимірювання перевищує допустиме значення, слід змінити струм СС, для чого необхідно аналізувати полярність отриманого інтеграла.

2. Аналіз спрацювання компараторів КП1 і КП2. Спрацювання КП1 веде до спрацювання захисту МК і відведення надлишкового струму, а КП2 контролює нижню допустиму межу змін напруги живлення МК.

3. Пошук компромісу, що забезпечить високу точність результату вимірювань. Щодо кроків 1 і 2 вище, доцільно взяти ємність Маг.С якнайбільшою, але з точки зору чутливості схеми слід взяти ємність Маг.С якнайменшою.

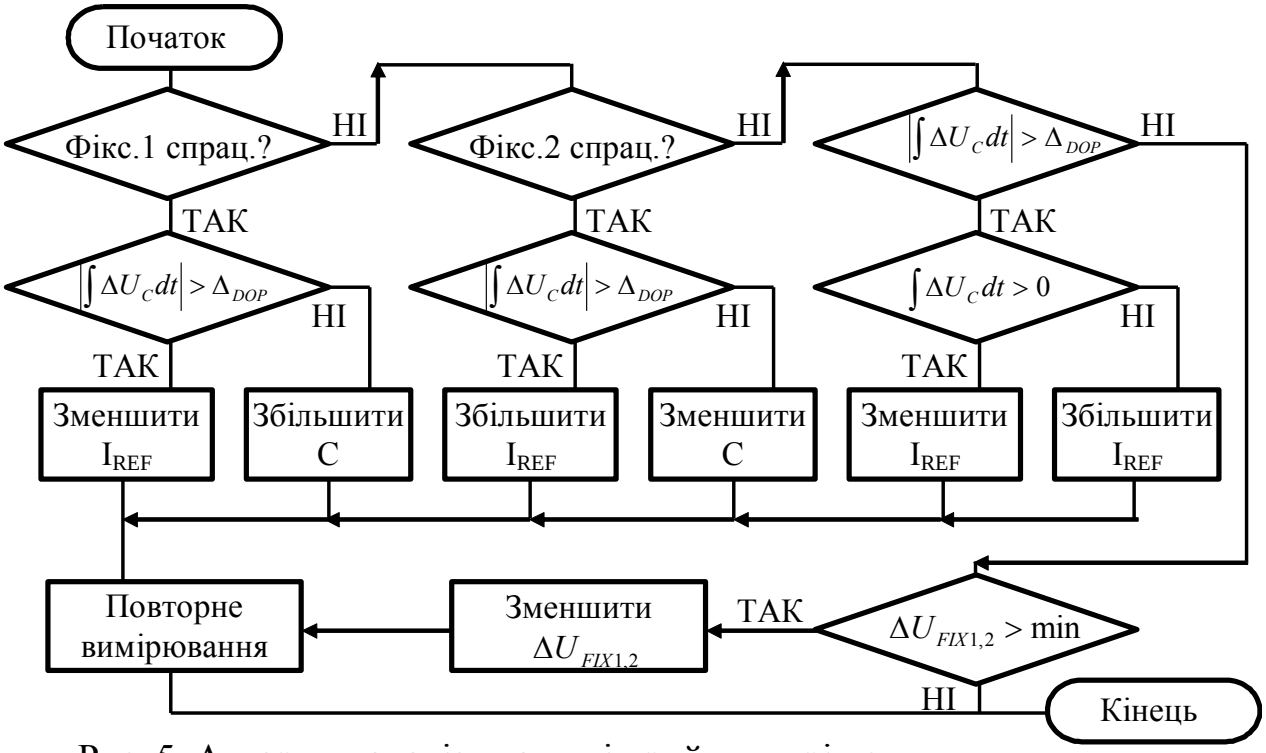

Рис. 5. Алгоритм аналізу даних і прийняття рішень

Алгоритм (див. рис. 5) складається з трьох уніфікованих блоків – перший визначає спрацювання захисту, другий – вихід за нижню межу, третій – зменшує допуск на виконання умови (6), що веде до підвищення точності вимірювання. Точність результатів вимірювання середнього енергоспоживання визначають:

1. Інструментальні похибки вимірювання напруги U_{REF}, струму I_{REF}, часу вимірювання T, що визначаються похибками апаратних засобів;

2. Методичні похибки, які визначаються неточним виконанням перелічених вище шести умов закінчення часу вимірювання T. Ці похибки не залежать від інструментальних похибок засобів вимірювання.

Методичні похибки більш небезпечні, вони визначають придатність методів до побудови систем відповідної точності, тому ці похибки слід дослідити перед тим, як буде прийнято рішення про допустимість використання запропонованих методів.

У третьому розділі досліджено методичні похибки запропонованих у другому розділі методів вимірювання середнього енергоспоживання МК та їх завадостійкість. Для цього розроблено нелінійну модель споживання струму МК, що включає початкову складову струму I_{MIN}, лінійну складову I_{LIN} та нелінійну складову $I_{NONLIN} = A \cdot \Delta U_{MK}^2 + B \cdot \Delta U_{MK}$, де коефіцієнти A, B визначаються заданою нелінійністю Δ_{nonlin}. Дослідження проведені імітаційним моделюваннм у середовищі розробки та виконання програм LabVIEW, тому модель адаптовано до середовища LabVIEW. Для проведення досліджень розроблено стенд обчислення методичних похибок пропонованих методів.

Результати дослідження методичної похибки δ_{MET1}^{Σ}, викликаної нелінійним споживанням струму МК при виконанні умови (6), подано на рис. 6 і 7. Тип А нелінійності має від'ємну першу похідну функції струму від напруги, а тип В – додатню. Як видно з рис. 6, 7, похибка δ_{MET1}^{Σ} мала, нею можна нехтувати.

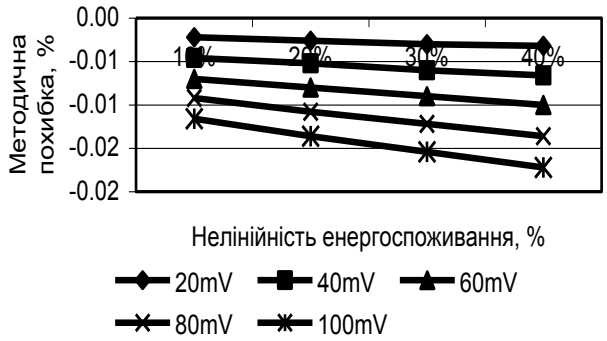

Рис. 6. Методична похибка δ_{MET1}^{Σ} при нелінійності споживання струму типу А

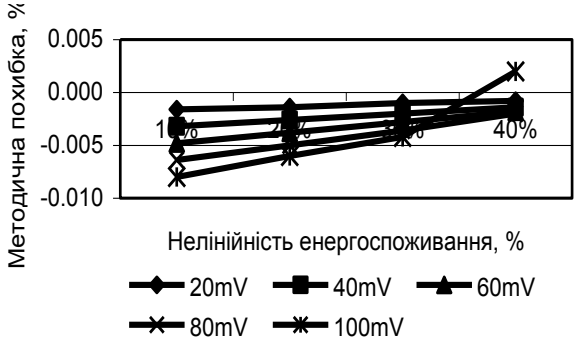

Рис. 7. Методична похибка δ_{MET1}^{Σ} при нелінійності споживання струму типу В

Результати дослідження зміни напруги конденсатора в колі живлення МК і методичної похибки δ_{MET2} від неї (виконання умови (4)) показують (див. рис. 8 і 9), що при відповідному виборі елементів схеми при реалізації пропонованих методів, методична похибка δ_{MET2} мала, нею можна нехтувати.

Вплив завад на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК при виконанні сформульованих у другому розділі умов та вимог закінчення процесу вимірювання можна дослідити за допомогою розробленого у середовищі LabVIEW стенда. Результати дослідження залежності максимальної відносної похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК від відхилення часу вимірювання від одного періоду мережі живлення (один квант відхилення тривалості рівний 0,11 мс, тобто приблизно 0,5%) при дії завади амплітудою від 2 до 64 мВ показано на рис. 10. Як видно, навіть при значних амплітудах завади та відхиленнях часу вимірювання від оптимального до 5% похибка від дії завад залишається малою.

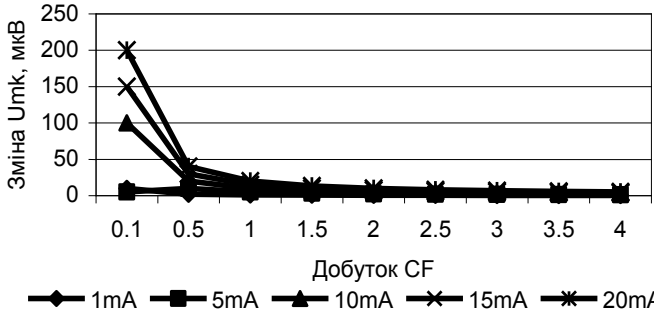

Рис. 8. Зміна напруги конденсатора в колі живлення МК від добутку його ємності на частоту тактового генератора

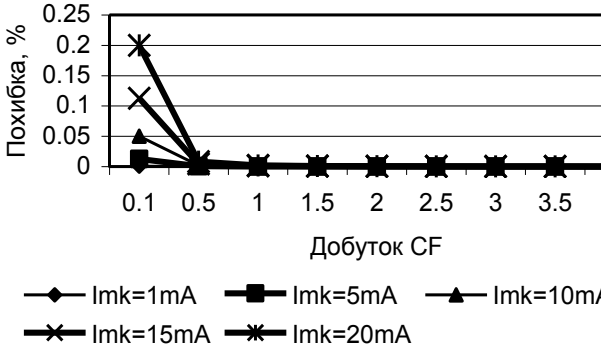

Рис. 9. Методична похибка δ_{MET2} від зміни напруги конденсатора в колі живлення МК

На рис. 11 показано можливість додаткового зменшення похибки від дії завад за рахунок продовження часу вимірювання до 2…6 періодів мережі 50 Гц.

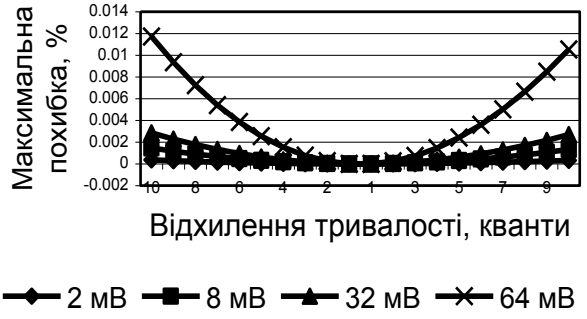

Рис. 10. Похибка від впливу завад для часу вимірювання, рівного одному періоду мережі 50 Гц

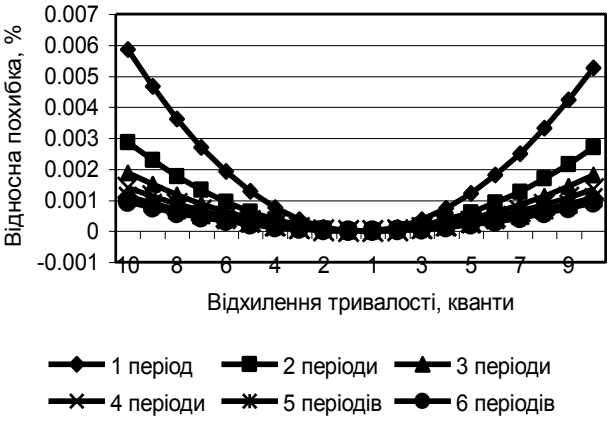

Рис. 11. Похибка від впливу завади амплітудою 32 мВ від кількості періодів мережі 50 Гц

Як видно (див. рис. 6…11), дослідження методичних похибок і завадостійкості пропонованих методів вимірювання середнього енергоспоживання підтвердили високу точність та завадостійкість цих методів.

У четвертому розділі створено ІВС енергоспоживання МК, що забезпечує вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання (рис. 12). Створена система базується на ІВС миттєвого енергоспоживання, куди введено:

1. Два вимірювальні канали – перший – підсистеми регулювання струму стабілізатора струму живлення МК і другий – вимірювання відведеної енергії при спрацюванні захисту (для схеми рис. 4, 5 не потрібний).

2. Підсистему керування струмом СС, ємністю Маг.С та напругами спрацювання КП1 і КП2 (їх задають ЦАП 1 і ЦАП 2).

3. Підсистему прийняття рішення про дозвіл закінчення вимірювання, яка забезпечує виконання сформульованих у другому розділі шести правил.

4. Підсистему обчислення результату вимірювання середнього енергоспоживання МК.

5. Підсистему порівняння результатів вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання МК для можливого припинення навчання нейронної мережі при значних розходженнях середнього та миттєвого енергоспоживання.

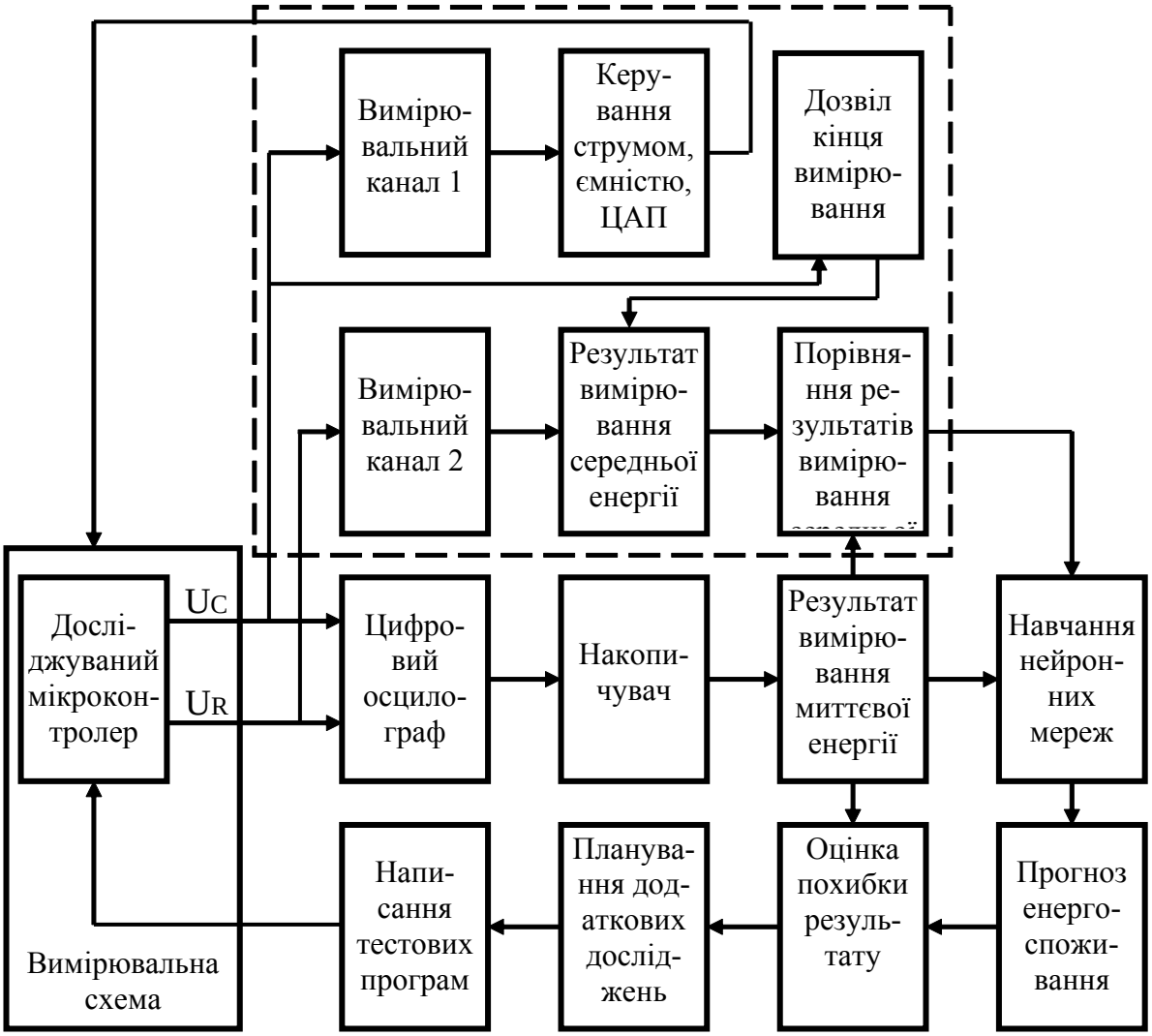

Рис. 12. Архітектура створеної ІВС енергоспоживання МК

В архітектурі (див. рис. 12) також важливою є третя підсистема – прийняття рішення про дозвіл закінчення вимірювання згідно запропонованого методу забезпечення завадостійкості. Її роботу пояснює рис. 14, де показано синусоїду завади U_{SIN} в кінці періоду, допустимі межі $\pm\Delta T_{SIN}$, в яких забезпечується достатній захист від завад (є дозвіл від відповідного компаратора), зазначено допустимі межі часу вимірювання T_{MIN}, T_{MAX}, а також показано виконання умови (4) – зміна напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не перевищує допустиме значення (є дозвіл від відповідного компаратора). Виконання умови (6) – зміна інтеграла напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не перевищує допустиме значення (дозвіл від РСС), перевіряється після закінчення вимірювання. Вертикальними стрілками (див. рис. 13) показано моменти закінчення виконання програми, енергоспоживання якої визначається.

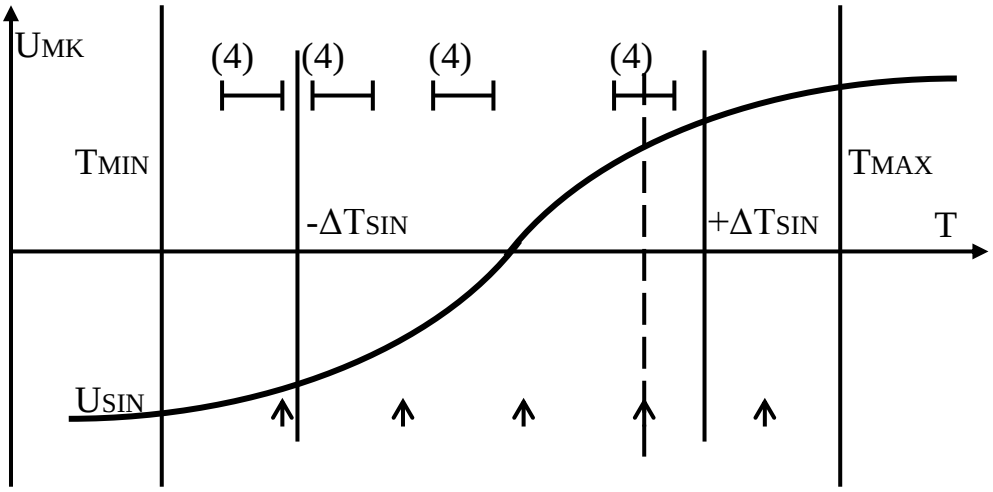

Рис. 13. Робота підсистеми прийняття рішення про закінчення вимірювання

З рис. 13 видно, що співпадання перших п'ятьох із шести обмежень і вимог (див. вище) відбулося, це співпадання відзначене штриховою лінією. Однак імовірність того, що воно може не відбутися – велика. Шосту вимогу, виконання умови (6), можна оцінити лише по закінчені вимірювання. Тому, якщо шоста вимога не виконана, необхідно повторити процедуру вимірювання заново. Якщо всі обмеження (вимоги) не виконуються декілька разів поспіль, необхідно змінити умови закінчення вимірювання – найефективніше встановити інші допуски на виконання умов (4) і (6).

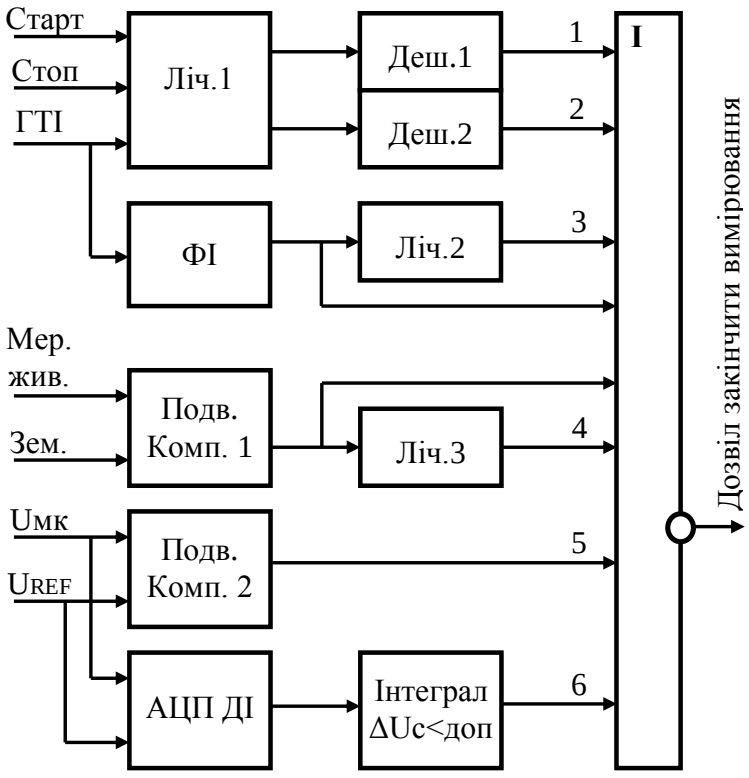

Рис. 14. Підсистема слідкування за виконанням правил закінчення вимірювання

Через необхідність постійного слідкування за виконанням кожної вимоги у реальному часі доцільно реалізувати апаратно підсистему прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання (рис. 14). Мінімальний та максимальний час вимірювання T_{MIN}, T_{MAX} формують лічильник Ліч.1 (рахує тактові імпульси генератора МК) та дешифратори Деш.1 і Деш.2. За цими ж імпульсами формувач ФІ та лічильник Ліч2 формують імпульси, що відповідають моментам закінчення виконання МК досліджуваної програми, Допустимі межі $\pm\Delta T_{SIN}$, де забезпечується достатній захист від завад, формує подвійний компаратор Подв.Комп.1. Лічильник Ліч.3 підраховує періоди мережі живлення. Для перевірки умови (4) використано також подвійний компаратор Подв.Комп.2.

Для перевірки умови (6) використано АЦП двохтактного інтегрування АЦП ДІ. Всі дозволи об'єднує схема І (див. рис. 14).

Розроблено принципову схему уніфікованого подвійного компаратора (рис. 15). На його входи Вх1 і Вх2, при використанні як Подв.Комп.1, подаються напруга мережі живлення з додаткової обмотки трансформатора та земля. При використанні як Подв.Комп.2 на входи Вх1 і Вх2 подаються напруга на МК та вихідна напруга стабілізатора напруги СН. Поріг спрацювання для додатної напруги задається резистором R4, а для від'ємної – резистором R5. Резистор R1 та конденсатор С1 представляють собою фільтр високочастотних завад (див. рис. 15).

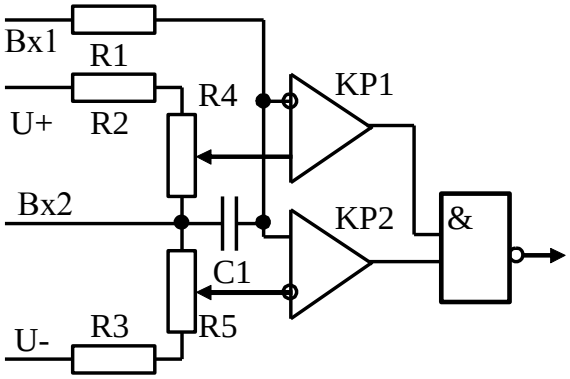

Рис. 15. Принципова схема уніфікованого подвійного компаратора

Розроблено уніфікований АЦП двохтактного інтегрування для використання у обох вимірювальних каналах (рис.16). АЦП двохтактного інтегрування у складі вимірювального каналу 1 призначений для інтегрування різниці напруг між стабілізатором напруги СН та живлення досліджуваного МК. АЦП двохтактного інтегрування у складі вимірювального каналу 2, інтегрує спад напруги на резисторі схеми захисту, відносно виходу стабілізатора напруги СН. При використанні промислових АЦП двохтактного інтегрування, необхідно було б забезпечити їх незалежне від решти схеми живлення та гальванічну розв'язку для обох АЦП двохтактного інтегрування і вимірювальної схеми, що значно ускладнить схему. Інакше неминуче виникнуть завади загального виду, які зведуть нанівець заходи з підвищення завадостійкості. Крім того, запропонований метод забезпечення завадостійкості вимагає АЦП двохтактного інтегрування з не визначеною на перед тривалістю першого такту, а такі АЦП не випускаються.

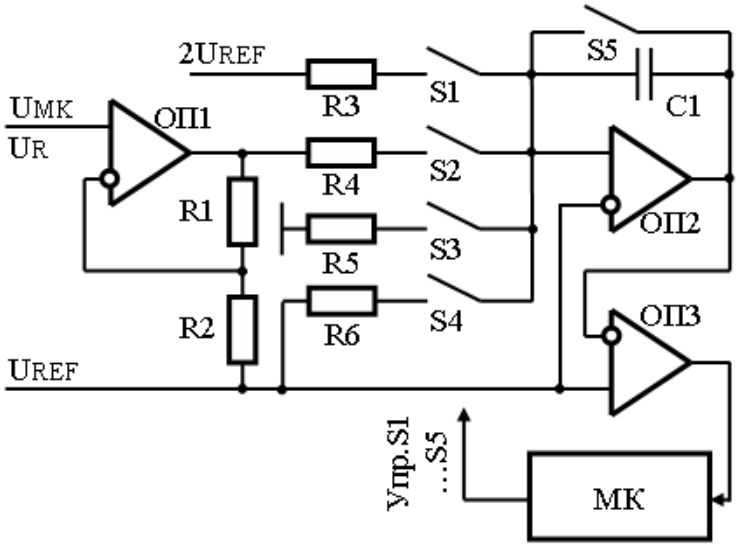

Рис.16. Схема уніфікованого аналого-цифрового перетворювача двохтактного інтегрування

У схему уніфікованого АЦП двохтактного інтегрування (див. рис. 16) входять вхідний підсилювач на операційному підсилювачі ОП1 та резисторах R1, R2 (подільник зворотного зв'язку), інтегратор на операційному підсилювачі ОП2, конденсаторі С1 та резисторах R3 … R6. Ключі S1 … S4 підключають до входу

інтегратора: S4 – уявну землю UREF (при встановленні початкового стану перед вимірюванням); S2 – вихідну напругу підсилювача (під час вимірювання); S1 – напругу розряду інтегратора 2UREF у другому такті (якщо вихідна напруга ОП2 в кінці першого такту додатня відносно уявної землі UREF); S3 – землю для розряду інтегратора у другому такті (якщо вихідна напруга ОП2 в кінці першого такту від'ємна відносно уявної землі UREF). Ключ S5 закорочує конденсатор C1 при встановленні початкового стану. Компаратор (операційний підсилювач ОП3) АЦП двохтактного інтегрування входить у склад МК типу AVR2313.

Похибка вимірювання розробленого АЦП двохтактного інтегрування (див. рис. 16) практично повністю визначається похибками стабілізаторів напруги UREF і 2UREF і резисторів R1 … R6. Але при виготовленні АЦП двохтактного інтегрування буде відкалібрований. Це означає, що значення напруги UREF і 2UREF та опору резисторів R1 … R6 будуть виміряні прецизійним тестером і записані у постійну пам'ять мікроконтролера, який повинен, при обчисленні результату вимірювання, використовувати дійсні, а не номінальні, значення напруг і опорів). Тому відхилення дійсних значень напруг UREF, 2UREF і резисторів R1 … R6 від номінальних не створюють похибку результату вимірювання. В такому випадку похибка АЦП ДІ визначається температурною та часовою нестабільністю цих елементів. Проведена оцінка показала, що, при використанні вдосконалених стабілізаторів типу AD480 фірми Analog Devices та метало-плівкових резисторів С2-29, похибка вимірювання АЦП ДІ не перевищує 0,2%.

Розроблено також програмне забезпечення пропонованої ІВС, яке реалізує: узагальнений алгоритм роботи підсистем ІВС середнього енергоспоживання МК, алгоритм налаштування струму стабілізатора струму СС вимірювального каналу (див. рис. 5) та алгоритм порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК за миттєвою та середньою енергіями, а також алгоритм роботи МК АЦП двохтактного інтегрування.

Виконано оцінку інструментальних похибок ІВС середнього енергоспоживання. Вони, згідно (9), визначаються похибками вимірювання U_{REF} та I_{REF} цифровим тестером двохтактного інтегрування, наприклад, UT70D. Зокрема, похибка δ_{UREF} на діапазоні $8\ V$ при вимірюванні напруги $5\ V$ не більше $0{,}1\%$. При вимірюванні струму в діапазоні $I_{REF} = 10 \ldots 80\ mA$ похибка не більша $\delta_{IREF} = 0{,}5 \ldots 0{,}25\ \%$, тобто це значення є завеликим. Зменшити δ_{IREF} можна за рахунок вимірювання UT70D спаду напруги на магазині опору, наприклад, MCP-63 (похибка $\delta_R \le 0{,}05\%$). В такому разі похибка не перевищуватиме $\delta_{IREF} = \sqrt{\delta_{UREF}^2 + \delta_R^2} \approx 0{,}09\%$. Похибка часу вимірювання T визначається похибкою кварцового резонатора і є меншою $0{,}01\%$, тобто нею можна нехтувати. При вимірюванні енергії E_R, відведеної захистом, домінує похибка розробленого АЦП, що не перевищує $\delta_{ADC} \le 0{,}2\%$. Але, згідно (10), E_R практично у 10 разів менша за E_{REFI}, тому впливом δ_{ADC} можна також нехтувати. Інструментальна похибка ІВС середнього енергоспоживання не перевищує $\delta_{INS} = \sqrt{\delta_{UREF}^2 + \delta_{IREF}^2} \approx 0{,}15\%$, що у 5 разів менше похибки миттєвого

енергоспоживання. А похибка порівняння результатів вимірювання середнього і миттєвого енергоспоживання $\delta_P \approx 0{,}08\%$.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена та вирішена науково-технічна задача створення інформаційно – вимірювальної системи енергоспоживання мікроконтролерів, яка за рахунок нових методів вимірювання та поєднання ІВС миттєвого та середнього енергоспоживання забезпечує високу точність і завадостійкість виміру енергоспоживання МК при виконанні наборів інструкцій, команд, програм або їх фрагментів.

1. Проведено аналіз відомих методів вимірювання середнього енергоспоживання МК. Встановлено, що вони мають значні похибки через неконтрольований обмін енергією або паразитні параметри схеми, а кращий метод вимірювання миттєвого енергоспоживання МК, хоч і має вищу точність, а МК працює у нормальному (штатному) режимі, але має малу завадостійкість і схильність до накопичення похибки вимірювання.

2. Запропоновано метод вимірювання середнього енергоспоживання МК, що, за рахунок роботи МК у штатному режимі та впливу, в основному, на результат виміру прецизійних амперметра і вольтметра постійного струму, забезпечує високу точність і завадостійкість виміру енергоспоживання МК при виконанні наборів інструкцій, команд, програм або їх фрагментів.

3. Запропоновано метод вимірювання середнього енергоспоживання МК, що, за рахунок налаштування ємності конденсатора в колі живлення МК, струму та меж зміни напруги його живлення, забезпечує автоматизацію вимірювань і вплив на похибку результату вимірювань лише прецизійних амперметра і вольтметра постійного струму.

4. Запропоновано методику оцінки методичних похибок запропонованих у пп. 2, 3 методів шляхом розроблення моделі нелінійного споживання струму МК та стенду моделювання у середовищі LabVIEW. Дослідження показали, що, при відповідному виборі елементів кола живлення МК, тактової частоти та виконання розроблених шести правил закінчення процесу вимірювання, методичні похибки не перевищують декількох сотих відсотка.

5. За допомогою розробленого стенду проведено дослідження запропонованого методу зменшення впливу завад на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК. В результаті показано, що при виконанні шести обмежень (вимог) закінчення процесу вимірювання, похибка вимірювання, викликана завадами значної амплітуди, не перевищує 0,01%.

6. Розроблено архітектуру, апаратне та програмне забезпечення ІВС, енергоспоживання МК, що поєднує ІВС миттєвого та середнього енергоспоживання для підвищення достовірності вимірювання енергії виконання МК наборів інструкцій, команд і програм за рахунок порівняння результатів вимірів. Досліджено, що похибка вимірювання середнього енергоспоживання не перевищує 0,15%, а похибка порівняння результатів миттєвого та середнього енергоспоживання не перевищує 0,08%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Hrusha V. Distributed Web-based Measurement System / V. Hrusha, O.Osolinskiy, P.Daponte, D.Grimaldi, R.Kochan, A.Sachenko, I.Turchenko // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2005): the 3th IEEE Workshop, 5-7 September 2005: Proceedings of the Workshop – Sofia, Bulgaria, 2005.– P.355-358. (індексована наукометричними базами Web of Science і SCOPUS).

2. Груша В.М. Веб-базована розподілена система вимірювання / В.М. Груша, О.Р. Осолінський, Р.В. Кочан, А.О. Саченко, В.О. Турченко // Вісник Хмельницького національного університету.– 2006. – №5(85). – С. 115 - 119.

3. Hrusha V. Development of Measurement System with Remote Access Based on Internet / V. Hrusha R. Kochan, Y. Kurylyak, O. Osolinskiy // Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2007): the 4th IEEE Workshop, 6-8 September 2007: Proceedings of the Workshop – Dortmund, Germany, 2007.– P.126-128. (індексована наукометричними базами Web of Science і SCOPUS).

4. Hrusha V. Distributed on-line Temperature Control System / V.Hrusha, O.Osolinskiy, A.Sachenko, R.Kochan // Computing. –2007.– Vol. 6, Issue 7. – P.62-67.

5. Turchenko I. Approach to Neural-based Identification of Multisensor Conversion Characteristic / I. Turchenko, O. Osolinskiy, V. Kochan, A. Sachenko, R. Tkachenko, V. Svyatnyy, M. Komar //Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2009): the 5th IEEE Workshop, 21 – 23 September 2009: Proceedings of the Workshop – Rende (Cosenza), Italy, 2009. – P. 27-31. (індексована наукометричними базами Web of Science і SCOPUS).

6. Осолінський О.Р. Метод вимірювання середньої енергії споживання мікропроцесорів / Осолінський О.Р., Кочан В.В. // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, 17-18 травня 2013р.: тези доповідей – Тернопіль, 2007. − С. 117-118.

7. Kochan V. Method of Microprocessors Average Energy Consumption measurements /V. Kochan, O. Kochan, O. Osolinskiy // Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2013): the 7th IEEE International Conference, 12-14 September 2013: Proceedings of the International Conference – Berlin, Germany, 2013. − P.94-98. (індексована наукометричною базою SCOPUS).

8. Zhongju Chen. Methods of Microprocessors Average Energy Consumption Measurements / Zhongju Chen, Oleksandr Osolinskiy, Volodymyr Kochan, Orest Kochan // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science (TCSET'2014): International Conference, 25 February – 1 March 2014: Proceedings of the International Conference – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 233.

9. Осолінський О.Р. Оцінка методичної похибки методу вимірювання середньої енергії споживання мікропроцесорів / Осолінський О.Р. // Сучасні

комп'ютерні інформаційні технології: матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, 16-17 травня 2014 р.: тези доповідей – Тернопіль, 2014. − С. 79-81.

10. Осолінський О.Р. Система вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів /О.Р. Осолінський, В.В. Кочан, П.Є. Биковий, М.І. Чирка // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – №4 (49). – С. 109-113.

11. Пат. 110142 Україна, МПК G01R 11/00, G01R 21/00, G05F 5/00. Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача та пристрій для його реалізації / Осолінський О.Р., Кочан В.В., Домбровський З.І., Кочан О.В.; заявник і патентовласник Осолінський О.Р., Кочан В.В., Домбровський З.І., Кочан О.В.; – № а 2014 03292; заявл. 31.03.14; опубл. 25.11.15, Бюл. №22.

12. Osolinskiy O. Research Methodological Deviation of Average Energy Consumption Measurements Microcontrollers / O. Osolinskiy, V. Kochan, O. Kochan, A. Karachka // Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2015): The 8th IEEE International Conference, 24-26 September 2015: Proceedings of the International Conference – Warsaw, Poland, 2015.− P. 62-67. (індексована наукометричною базою SCOPUS).

13. Осолінський О.Р. Дослідження методичної похибки вимірювання середнього енергоспоживання мікропроцесорів / Осолінський О.Р., Вірастюк Р.Р., Кочан В.В. // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, 22-23 травня 2015 р.: тези доповідей – Тернопіль, 2015. −С. 50-53.

14. Осолінський О.Р. Вдосконалена система вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів / О.Р. Осолінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. –№3. – С. 104-108.

15. Осолинский А.Р. Стенд исследования методических погрешностей системы измерения среднего энергопотребления микроконтроллеров / А.Р. Осолинский, О.В. Кочан // Вестник брестского государственного технического университета. – 2015. – №5 (95). – С. 6-9.

16. Oleksandr Osolinskyy Research of Interference immunity of the System for Measuring the Average Energy Consumption of Microcontrollers / Oleksandr Osolinskyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science (TCSET'2016): the XIII th. International Conference, 23–26 February 2016: Proceedings of the International Conference – Lviv-Slavske, Ukraine, 2016. – P.284-288. (індексована наукометричною базою SCOPUS).

АНОТАЦІЯ

Осолінський О.Р. Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Тернопільський національний економічний університет, Міністерства освіти і науки України, Тернопіль, 2016.

Дисертацію присвячено створенню інформаційно-вимірювальної системи

(ІВС) енергоспоживання мікроконтролерів (МК), яка має підвищену точність і завадостійкість вимірювання та порівняння середнього та миттєвого енергоспоживання, за рахунок розроблених методів вимірювання середнього енергоспоживання МК та правил встановлення тривалості процесу вимірювання.

У дисертації запропоновано методи вимірювання середнього енергоспоживання МК, які, за рахунок роботи МК у нормальному (штатному) режимі, та використання для вимірювань прецизійного тестера постійного струму дають змогу з високою точністю виміряти енергоспоживання МК при виконанні наборів інструкцій, команд, програм або фрагментів програм. Запропоновано систему оцінки методичних похибок вимірювання середнього енергоспоживання МК яка показала, що ці похибки не більші 0,02%, похибка від завад значної амплітуди не більша 0,01%, похибка вимірювання середнього енергоспоживання не більша 0,15%, а похибка порівняння миттєвого та середнього енергоспоживання не більша 0,08%. Розроблено архітектуру ІВС енергоспоживання МК, що поєднує ІВС миттєвого та середнього енергоспоживання для підвищення достовірності вимірювання енергії виконання МК команд, програм та їх фрагментів шляхом порівняння результатів вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, енергоспоживання, мікроконтролер, мікропроцесор, похибка.

АННОТАЦИЯ

Осолинский А.Р. Информационно-измерительная система энергопотребления микроконтроллеров. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. - Тернопольский национальный экономический университет, Министерства образования и науки Украины, Тернополь, 2016.

Диссертация посвящена созданию информационно-измерительной системы (ИИС) энергопотребления микроконтроллеров (МК), имеющей высокую точность и помехоустойчивость измерения и сравнения среднего и мгновенного энергопотребления за счет разработанных методов измерения среднего энергопотребления МК и правил задания времени процесса измерения.

В диссертации предложены методы измерения среднего энергопотребления МК, которые предусматривают работу МК в нормальном (штатном) режиме и его питание от стабилизатора постоянного тока, ток которого настраивается таким образом, чтобы за время измерения интеграл отклонения напряжения на МК не превышал допустимого отклонения от номинального напряжения питания МК. Тогда, при выполнении разработанных шести правил окончания процесса измерения, результат измерения вычисляют по показаниям прецизионного тестера постоянного тока, что позволяет с высокой точностью измерять среднее энергопотребление МК при выполнении наборов инструкций, команд, программ и фрагментов программ. Предложена методика оценки методических погрешностей измерения среднего энергопотребления МК из-за упрощений уравнений его вычисления. В среде разработки и выполнения программ LabVIEW создана виртуальная система исследования упомянутых методических погрешностей и исследования помехоустойчивости предложенных методов. Исследования

показали, что методические погрешности не превышают 0,02%, а погрешность из-за воздействия помех значительной амплитуды не превышают 0,01%.

Разработана архитектура ИИС энергопотребления МК, сочетающей измерение мгновенного и среднего энергопотребления для повышения достоверности измерения энергии выполнения МК наборов инструкций, команд, программ и их фрагментов путем сравнения результатов измерения мгновенного и среднего энергопотребления. Также разработаны компоненты этой ИИС – двойной компаратор и аналого-цифровой преобразователь двухтактного интегрирования. Оценка инструментальных погрешностей показала, что суммарная погрешность измерения среднего энергопотребления не превышает 0,15%, а погрешность сравнения мгновенного и среднего энергопотребления не превышает 0,08%.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, энергопотребление, микроконтроллер, микропроцессор, погрешность.

ABSTRACT

Osolinskyy O.R. Information-Measuring System of Microcontrollers Power Consumption. The manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.05 - Computer Systems and Components. - Ternopil National Economic University, Ternopil, 2016.

In the thesis described devoted to the creation of system of power consumption of the microcontrollers, which has improved accuracy and immunity measuring and comparing the average and instantaneous energy consumption by developed methods for measuring average power consumption microcontrollers and rules for establishing the duration of the measurement process.

In the thesis are proposed a methods of measuring the average power consumption IC, which through the work of the MC in the normal mode, allows you to accurately measure their energy consumption both when performing multiple repetition of instructions, and when executing commands, programs or fragments.

Also, a system evaluation methodology average power measurement errors MK which showed that the errors of modern IC with a maximum current of 20 mA, the measurement error caused by large amplitude interference, not more than 0.01%, the error of measuring the average power consumption is less than 0.15 %, and the error comparison results instantaneous and average power consumption does not exceed 0.08%.

Developed the architecture of information-measuring system of power consumption of the microcontrollers, which provides a combination of information-measuring system the instantaneous and average energy consumption to improve the reliability of the measurement of the energy performance of microcontrollers large sets of instructions, commands, programs, and their fragments by comparing the results of measurement of instantaneous and average power consumption.

Key words: information-measuring system, power consumption, microcontroller, microprocessor, measurement error.

Підписано до друку 25.05.2016 р.
Формат 60х84/16. Гарнітура Times.
Папір друк. Друк офсетний.
Умов. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 05/16/3-6

Віддруковано у видавничому центрі "Вектор"
46018, м. Тернопіль, вул. Львівська, 12,
Тел. 8 (0352) 40-08-12

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ТР № 46 від 07 березня 2013р.
ФО Осадца Ю.В.