

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний економічний університет

На правах рукопису

Осолінський Олександр Романович



УДК 004.925.4

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація на здобуття наукового ступення
кандидата технічних наук

*Ідентичність всіх
примірянок дисертації
Засвідчую:
Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради К 58.082.02.*

Науковий керівник:
Кочан Володимир Володимирович,
кандидат технічних наук, доцент



Тернопіль — 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ	10
1.1 Аналіз характеру енергоспоживання мікроконтролерів	10
1.2 Аналіз методів вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів	13
1.3 Аналіз методів вимірювання миттєвого енергоспоживання мікроконтролерів	17
1.4 Інформаційно-вимірювальна система миттєвого енергоспоживання мікроконтролерів	27
1.5 Шляхи підвищення точності вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів	30
Висновки до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СЕРЕДНЬОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ	34
2.1 Теоретичні основи методів вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів	34
2.2 Метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів	40
2.3 Метод автоматичного вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів	47
2.4 Алгоритм прийняття рішень при автоматичному вимірюванні середнього енергоспоживання мікроконтролерів	55
Висновки до розділу 2	61
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	62
3.1 Методика дослідження методичних похибок пропозованих методів	62
3.2 Оцінка методичної похибки від інтеграла зміни напруги на мікроконтролері	69

	3
3.3. Оцінка методичної похибки від зміни напруги на мікроконтролері.....	77
3.4. Оцінка завадостійкості вимірювального каналу	87
Висновки до розділу 3	91
РОЗДІЛ 4 ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА	
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ	93
4.1 Архітектура інформаційно-вимірювальної системи.....	93
4.2 Апаратні засоби інформаційно-вимірювальної системи.....	97
4.3 Алгоритми роботи інформаційно-вимірювальної системи.....	104
4.4 Оцінка похибки інформаційно-вимірювальної системи	109
Висновки до розділу 4	112
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116
Додаток А Акт впровадження ТзОВ "Елекс"	137
Додаток Б Акт впровадження "Сайпрес Семікондактор"	138
Додаток В Акт впровадження ТОВ "Світлоцентр"	139
Додаток Г Акт впровадження в учбовий процес	140
Додаток Д Акт впровадження в науково-дослідній роботі	141
Додаток Е Патент України № 110142	142

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЗ — апаратне забезпечення

АЦП — аналогово-цифровий перетворювач

АЦП ДІ — аналогово-цифровий перетворювач двохтактного інтегрування

ІВС — інформаційно-вимірювальна система

МП — мікропроцесор

МК — мікроконтролер

НМ — нейронна мережа

ПЗ — програмне забезпечення

ВСТУП

Актуальність роботи.

Вбудовані комп'ютерні системи з автономним живленням [1-11] використовуються все ширше. Їх компоненти, виготовлені за КМОН технологією [3, 12-15], 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 [11, 20-24], але він вимагає ґрунтовних фундаментальних досліджень (створення нових матеріалів, їх випробування), тому дуже дорогий. Другий шлях – вдосконалення КМОН технології [11, 21-23, 25], має ті ж недоліки та придатний лише для нових виробів, так само, як і третій шлях – оптимізація апаратного забезпечення [11, 21, 26-45]. Перспективніший для України четвертий шлях – оптимізація програмного забезпечення за енергоспоживанням [1, 11, 46-51]. 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 [68-71] мають низьку точність. Однією з причин є потреба використання обладнання, що має необхідну точність саме в умовах вимірювання енергоспоживання КМОН мікросхем, [3, 12-15] 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 розподіленням 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 управлінням 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 напрямку 6.050101 "Комп'ютерні науки".

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації представлено та обговорено на 10 конференціях: 3-му, 4-му і 5-му міжнародному симпозиумі 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 Science 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

1.1 Аналіз характеру енергоспоживання мікроконтролерів

Як відомо [3, 62, 64], МК представляють собою обчислювальні пристрої (універсальні або спеціалізовані), в яких всі основні компоненти, необхідні для виконання обчислень (арифметико-логічний пристрій, його реєстри, пристрій мікропрограмного керування, генератор тактової частоти, схеми синхронізації, пам'яті програм і даних, реєстри вводу-виводу, інтерфейси, контролер переривань, а також інші пристрої, що забезпечують виконання обчислень), розміщені на одному кристалі. Таким чином, для забезпечення функціонування МК необхідно мінімум деталей – декілька конденсаторів та елемент, що задає частоту тактового генератора. Як останній можна використати кварцовий резонатор, керамічний резонатор (так званий "кристал") або коливний контур, який включає котушку індуктивності (зазвичай, з феритовим осердям для налаштування тактової частоти) та один або два конденсатори.

В даній дисертаційній роботі сучасні мікропроцесори та мікроконтролери розглядаються як об'єкти вимірювання енергоспоживання. В цьому відношенні вони між собою практично не відрізняються, через те, що вони виконуються за КМОН технологією та представляють собою пристрої, які працюють згідно імпульсів тактового генератора. Це означає, що:

1. Надалі будемо умовно розглядати лише мікроконтролери (МК), пам'ятаючи, що вони в сенсі енергоспоживання від мікропроцесорів (а також інших пристроїв, виконаних за КМОН технологією, наприклад, пам'яті, програмованих логічних матриць) практично не відрізняються.

2. МК щодо визначення їх енергоспоживання представляють собою дуже складні пристрої. При виконанні ними інструкцій (елементарних команд) основна частина спожитої енергії концентрується біля фронтів імпульсів тактового генератора (рис. 1.1), тобто при їх роботі миттєва споживана потужність значно, часом у сотні разів, перевищує потужність в стані спокою (в статичному режимі) [3, 12-15, 72, 73].

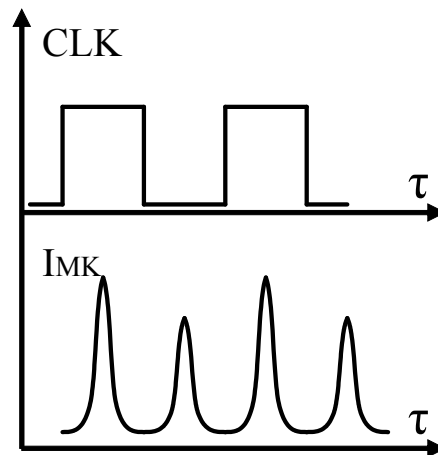


Рисунок 1.1 – Зміна миттєвого струму споживання МК згідно імпульсів тактового генератора

З викладеного можна зробити наступні висновки:

1. Зміни струму споживання мікроконтролера проходять дуже швидко – для сучасних швидкодіючих МК швидкість наростання / спадання напруги на виході логічних елементів перевищує 1000 В/мкс [3, 13, 74];
2. Такі значні (декілька Вольт) і швидкі зміни струму споживання визначають, що навіть провідники живлення мікроконтролера слід розглядати як довгі лінії [74, 75]. Через те напруга живлення МК може значно мінятися в процесі виконання інструкції;
3. Підтвердженням п. 2 є те, що мікроконтролер, підключені до джерела живлення без допоміжних конденсаторів, виявляються практично не працездатними – збиваються від змін напруги живлення [74, 75]. Як

показують експерименти, частота збоїв не дозволяє виконати навіть команди початкового налаштування МК;

4. Для виключення збоїв МК слід ввімкнути в коло живлення конденсаторний фільтр [74, 75] безпосередньо біля МК. Тоді вихідний опір кола живлення на високій частоті буде визначатися комплексним опором конденсатора (а не хвильовим опором довгої лінії, що підводить живлення до МК). Через необхідність зменшення вихідного опору кола живлення МК саме на високій частоті, слід використати високочастотні керамічні конденсатори достатньо великої ємності (типові значення ємності – 0,1...1 мкФ) [3, 74]. Важливим є також розміщення цього конденсатора на мінімальній відстані від самого МК. Для більшості МК типовими є вимоги розмістити цей конденсатор на відстані не більше 0,5...1 дюйма (12...25 мм) від корпусу МК [74, 75];
5. Вихідний опір кола живлення МК зменшують також шляхом встановлення додаткового низькочастотного електролітичного конденсатора служить для заряду високочастотного конденсатора. Цей конденсатор повинен мати відносно велику ємність. Типові значення ємності – 100...1000 мкФ [3, 74, 75]. Для цього конденсатора типові вимоги до відстані від корпусу МК значно менш жорсткі – допустима відстань становить до 100 мм [74, 75].

Як видно із поданих вище правил, навіть ввімкнення МК в коло живлення вимагає уваги. Ще більш складною задачею є ввімкнення в коло живлення МК пристрою вимірювання енергоспоживання. Це пов'язано з необхідністю ввімкнення входу вимірювального пристрою між високочастотним керамічним конденсатором і самим МК. При цьому необхідно забезпечити не тільки виконання перелічених вище вимог, а і малий вхідний опір вимірювального пристрою на високій частоті та малий рівень завад при вимірюванні. Слід відзначити, що виконати перелічені вимоги дуже складно – адже вони суперечать одна одній.

Таким чином, в даному параграфі розглянуто причини, через які виникають складнощі при вимірюванні енергоспоживання МК.

1.2 Аналіз методів вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів

Першим у 1994 р. почав вимірювати енергоспоживання мікропроцесора I486 Вівек Тіварі [76-78]. Він вимірював середнього енергоспоживання згідно схеми рис. 1.2 за допомогою цифрового вольтметра Fluke 87 [79] фірми Fluke (вольтметр вимірює спад напруги на резисторі-шунті, тобто реалізує цифровий амперметр), який працював за методом двотактного інтегрування. Такий вольтметр має відносно низьку швидкодію, але за те високу точність (похибка 0,05%) і завадостійкість.

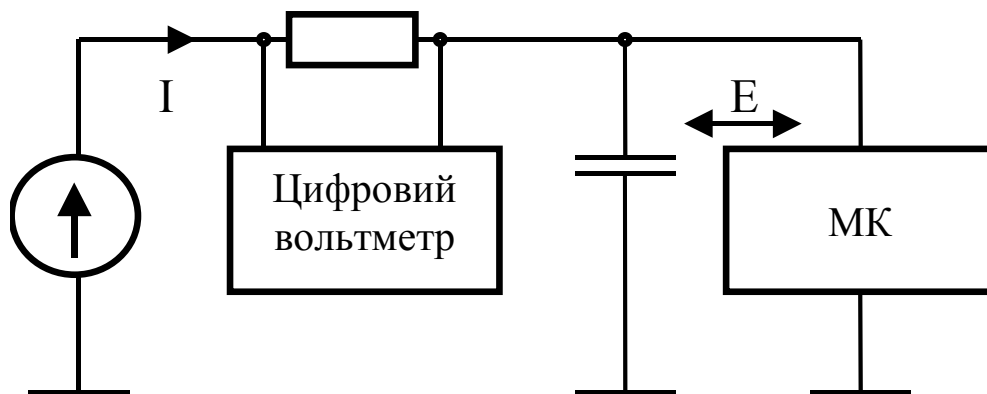


Рисунок 1.2 – Схема ввімкнення пристрою вимірювання середньої потужності споживання МК

Однак ввімкнення цифрового амперметра згідно рис. 1.2 дає змогу виміряти не струм споживання МК, а середній струм споживання системи МК + конденсатор в колі його живлення. А це спричиняє методичну похибку

вимірювання споживання струму МК. Причиною методичної похибки є те, що можливий не контрольований обмін енергією між конденсатором і МК. В такому випадку, при деякому вимірюваному цифровим амперметром середньому струмі (а метод двохтактного інтегрування передбачає вимірювання інтегралу вхідної фізичної величини за часовий інтервал, рівний тривалості першого такту інтегрування та представлення результату вимірювання як середнього значення) не можна вважати, що саме цей струм був спожитий МК. Частина цього струму могла піти на збільшення заряду (енергії) конденсатора (тоді його напруга зростає). Також можливий варіант, коли МК спожив струму більше за результат вимірювання, однак інерційність приладу двохтактного інтегрування не дала можливості це зафіксувати. В такому випадку надлишковий струм (енергія) поступає з конденсатора (тоді його напруга впаде). Однак в схемі рис. 1.2 не передбачене слідкування за зміною напруги конденсатора в колі живлення МК. Таким чином, конденсатор в колі живлення МК може або "приховувати" або "віддавати" енергію, а схема рис. 1.2 цього не фіксує.

Слід відзначити, що зафіксувати зміни напруги на конденсаторі в колі живлення МК доволі складно, адже, по-перше, вони достатньо малі. Оцінимо енергію E , яку "приховує" або "віддає" конденсатор C ємністю 1000 мкФ (типове значення ємності конденсатора у колі живлення МК) при зміні напруги ΔU на 100 мкВ. Цю енергію E можна оцінити за формулою [80]

$$E = \frac{C \cdot \Delta U_C^2}{2} = \frac{10^{-3} \cdot 10^{-4}}{2} = 50 \cdot 10^{-9} J, \quad (1.1)$$

Згідно [14, 59, 67], типова енергія, потрібна на виконання інструкції ADD для мікропроцесора ARM7TDMI становить приблизно $2 \cdot 10^{-9} J$, тобто зміна напруги на конденсаторі в колі живлення МК на 100 мкВ відповідає виконанню 25 інструкцій. Але зміна напруги живлення МК, рівної 5 В, на 100 мкВ відповідає зміні на 0,002%, тобто для визначення такої зміни необхідний

прецизійний цифровий вольтметр, роздільна здатність якого в багато разів менша за 0,002%.

По-друге, напруга на конденсаторі в колі живлення МК змінюється постійно. Тому треба було би, щоби прецизійний цифровий вольтметр був також швидкодіючим. Але тоді він не буде завадостійким, тобто його високу чутливість не вдасться реалізувати через завади від досліджуваного МК.

Таким чином, схема рис. 1.2 не придатна для вимірювання середнього енергоспоживання МК з високою точністю.

Для усунення впливу обміну енергією між МК та конденсатором в колі його живлення можлива модифікація схеми рис. 1.2, подана на рис. 1.3 [14].

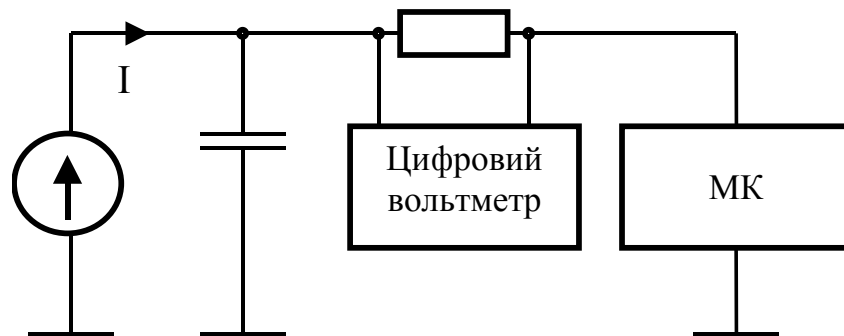


Рисунок 1.3 – Модифікована схема ввімкнення пристрою вимірювання середньої потужності споживання МК

Але при використанні схеми рис. 1.3 в коло живлення МК вноситься індуктивний опір резистора-шунта та провідників підключення цифрового вольтметра. Оцінимо вплив на напругу живлення МК внесеної дуже малої індуктивності $L = 0,1 \mu H$. Реактивний опір X_L індуктивності L можна обчислити за формулою [75]

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (1.2)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; f – частота.

Значення частоти f відповідає гармоніці частоти тактового генератора МК, яка забезпечує достатньо вірний опис форми імпульсного струму споживання МК (див. рис. 1.1). Для знаходження амплітуди завад, які викликає внесена індуктивність L , побудуємо графік їх амплітуди для перших п'ятих непарних гармонік при умові, що середній струм споживання МК $I_{МК} = 20 \text{ mA}$, а струм кожної n -ної гармоніки вдвічі менший за $I_{МК}$. Відповідний графік подано на рис. 1.4.

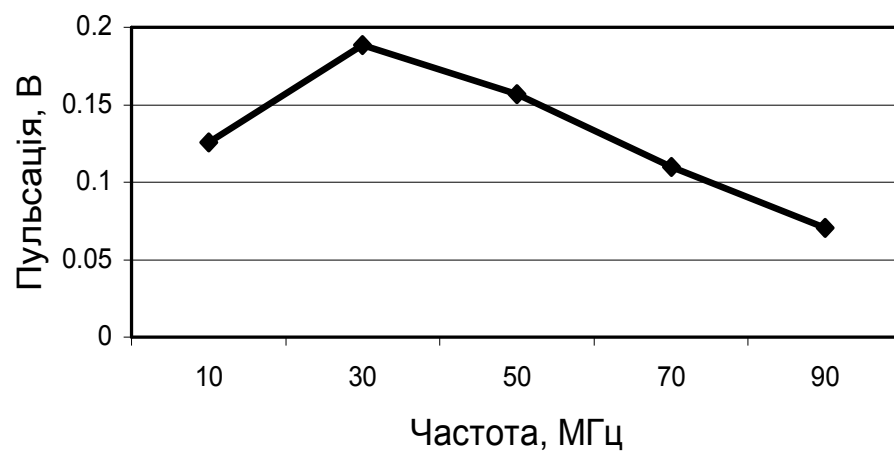


Рисунок 1.4 – Напруги пульсацій, викликані спадом напруги на внесеній індуктивності

Слід відзначити, що фази напруги пульсацій нам невідомі, вони скоріше всього змінюються через нерівномірність енергоспоживання МК при виконанні різних інструкцій. Тому пульсації будуть накладатися, тобто їх амплітуди можуть сумуватися [75]. В такому випадку сумарна напруга пульсацій перевищить 0,65 В, що приведе до збоїв МК при виконанні інструкцій. Таким чином, модифікована схема рис. 1.3 цілком не годиться для вимірювання енергоспоживання МК.

Таким чином, як показано у цьому параграфі, хоча використання відомих методів вимірювання середнього енергоспоживання МК забезпечує високу завадостійкість, похибка вимірювання виявляється досить високою. Тому результати таких вимірювань на практиці не дають можливість оптимізувати

програмне забезпечення МК за енергоспоживанням – похибки вимірювань часто перевищують різницю між енергоспоживанням окремих інструкцій [76-78]. Також отримані таким чином дані не годяться для прогнозування за допомогою нейронних мереж (НМ) енергії виконання інструкцій, які експериментально не досліджувалися [81-87] – похибки вимірювань не дадуть НМ добре навчитися, що приведе до високої похибки прогнозу, яка додатково накладається на похибку досліджень.

1.3 Аналіз методів вимірювання миттєвого енергоспоживання мікроконтролерів

Перевагами шляху вимірювання енергії, яку споживає кожна окремо виконана інструкція або між-інструкційний перехід, є безпосередня оцінка спожитої енергії [12-15, 72, 88, 89]. При цьому, завдяки відповідній синхронізації засобу вимірювання, можна відділити енергію, яку споживає окремо виконана інструкція, від енергії, яку споживає між-інструкційний перехід. Але основним засобом вимірювання при проведенні експериментів є високочастотний багатоканальний цифровий осцилограф, що вимагає:

1. спеціальної схеми перетворення струму споживання МК в напругу. Така схема перетворення повинна:

- 1.1. перетворювати в напругу миттєве значення споживаного струму і не впливати при цьому недопустимим чином на режим роботи МК на високій частоті. Така схема потрібна тому, що, при вимірюванні миттєвого струму споживання МК, ввімкнення конденсатора в коло його живлення після цієї схеми недопустиме. Такий конденсатор спотворить (проінтегрує) часову залежність миттєвої енергії виконання інструкцій, що

приведе до неможливості достатньо точного обчислення енергії виконання окремої інструкції та між-інструкційного переходу;

- 1.2. мати заземлений вихід. Інакше при ввімкненні цифрового осцилографа виникають високочастотні завади загального виду [13]. Такі завади можуть привести в кращому випадку до значної похибки вимірювання, а в гіршому – до повної непрацездатності МК;
2. використання засобу вимірювання (в основному цифрового осцилографа) з достатньо великим буферним оперативним запам'ятовуючим пристроєм для запису поточних результатів вимірювання в реальному часі;
3. розробки спеціалізованого програмного забезпечення для оброблення результатів вимірювання. Завданням такого програмного забезпечення є, по-перше, "вирізання" потрібних результатів вимірювання з масиву, який передається з буфера цифрового осцилографа в комп'ютер, а по-друге – саме оцінка енергії споживання при виконанні команд або інструкцій.

Виходячи з сказаного раніше, основним елементом системи вимірювання енергії МК, яку споживає власне окремо виконана інструкція або між-інструкційний перехід, є схема перетворення струму споживання МК в напругу. Жорсткі вимоги до швидкодії та завадостійкості таких схем значно обмежують коло варіантів побудови вимірювального кола системи.

Традиційно такі схеми перетворення струму в напругу будують на базі операційних підсилювачів (рис. 1.5) [90, 91]. Миттєві поточні значення потужності споживання p МК можуть бути обчислені за формулою [80]

$$p = U_{PS} \cdot u_{OA} / R_{ref}, \quad (1.3)$$

де U_{PS} – напруга джерела живлення МК, $U_{PS} = 5V$;

u_{OA} – миттєве значення напруги на виході операційного підсилювача;

R_{ref} – опір резистора зворотного зв'язку операційного підсилювача.

Але в схемі рис. 1.5 до операційного підсилювача ставляться жорсткі вимоги щодо швидкодії. Існуючі кращі швидкодіючі операційні підсилювачі мають граничну частоту підсилення $f_{1op} = 500...1000MHz$ [92].

На частоті дослідження МК $f_{\mu} = 5MHz$ їх коефіцієнт підсилення не буде перевищувати $K_f = 100...200$. Якщо прийняти максимальну вихідну напругу операційного підсилювача $U_{out_max} = 100mV$, то відносна похибка δ_K від обмеження коефіцієнта підсилення не буде перевищувати [90]

$$\delta_K = \frac{U_{out_max} \cdot 100\%}{U_{PS} \cdot K_f} = 0.01...0.02\%, \quad (1.4)$$

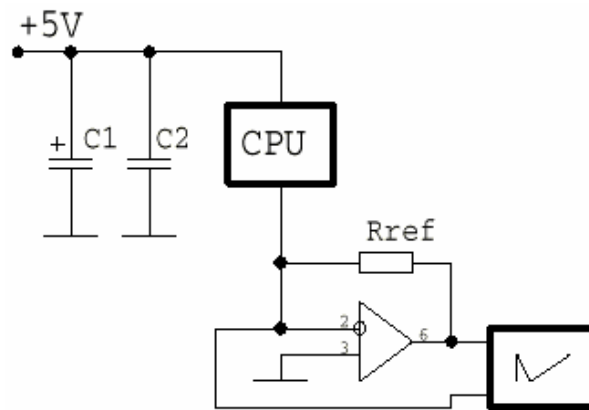


Рисунок 1.5 – Схема перетворення струму споживання МК в напругу на базі операційного підсилювача

Така мала похибка вимірювання струму цілком прийнятна [12-15]. Однак прийнятий метод її оцінки не цілком коректний. Він не враховує обмеження швидкості наростання вихідної напруги операційного підсилювача та фазового зсуву, який зростає з ростом частоти. Крім того, такий метод оцінки частотної похибки операційного підсилювача орієнтований на оцінку похибки передачі першої гармоніки. Виходячи зі сказаного, похибка δ_K дуже швидко росте з ростом частоти, при цьому є різною для різних гармонік.

Однак головним недоліком схеми рис. 1.5 та методу оцінки її похибок є те, що вони не враховують швидкість реакції операційного підсилювача [90]. Через обмежену швидкість реакції зворотний зв'язок не починає діяти миттєво, за цей час вхідні каскади операційного підсилювача насичуються, що додатково затримує встановлення напруги на виході операційного підсилювача. Тому МК при використанні схеми рис. 1.5 постійно збивається, отримати коректні результати вимірювання не можливо.

Отримати коректні результати вимірювання струму, який споживає МК при виконанні окремої інструкції або між-інструкційного переходу, можна при використанні схеми "струмового дзеркала" (рис. 1.6) [12-15]. Ця схема виконує практично всі перелічені вище вимоги до схем вимірювання миттєвого струму споживання МК. Внесений в коло живлення опір транзисторів VT1, VT2 є опором динамічним, тобто достатньо малим, не лише на низьких частотах. Існуючі надвисокочастотні транзистори мають граничну частоту підсилення декілька GHz , що дає можливість схемі рис. 1.6 уникнути збоїв МК.

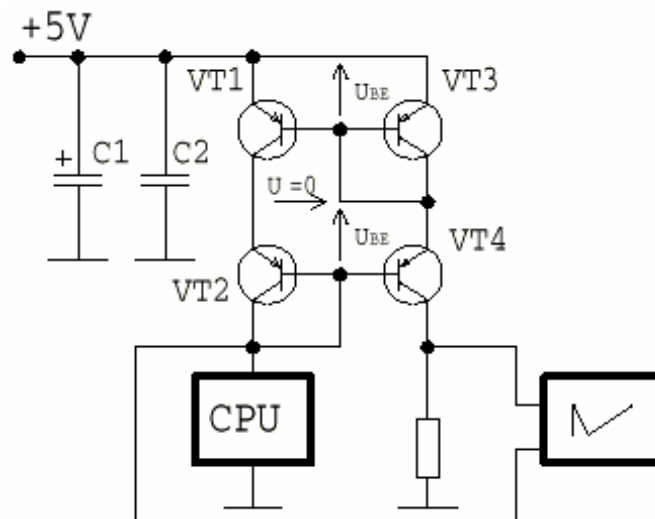


Рисунок 1.6 – Схема вимірювання струму споживання МК
на базі "струмового" дзеркала

Але схема на базі "струмового" дзеркала має відносно велику похибку, викликану неідеальністю вхідних характеристик біполярних транзисторів. Ця

похибка викликана тим, що при зміні струму споживання МК також змінюється спад напруги на база-емітерних переходах транзисторів "струмового" дзеркала [93]. Для зменшення відносної зміни струму споживання запропоновано збільшити струм споживання вітки МК за допомогою пасивного додаткового навантаження – резистора, ввімкненого паралельно до досліджуваного МК.

Але, незважаючи на це, зміна струму споживання МК все одно викличе зміну напруги ΔU_{BE} на база-емітерному переході транзистора (слід пам'ятати, що струм споживання МК, згідно рис. 1.1, змінюється у сто і більше разів). Для одного транзистора ΔU_{BE} досягає 0,15 В [94, 95], що веде до виникнення похибки δ_U миттєвого значення напруги на МК, яка, відносно напруги живлення U_{MK} , складає

$$\delta_U = (2\Delta U_{BE} \cdot 100\%) / U_{MK} = (2 \cdot 0,15 \cdot 100\%) / 5 = 6\% \%, \quad (1.5)$$

Можлива часткова корекція цієї похибки шляхом вимірювання дійсного значення миттєвої напруги u_{MP} на МК під час експериментальних досліджень. Тоді поточні миттєві значення потужності споживання p МК можна обчислити за формулою [80]

$$p = u_{MP} \cdot u_{Rn} / Rn, \quad (1.6)$$

де u_{Rn} – миттєві значення спаду напруги на резисторі Rn .

Але таким чином не вдається скорегувати методичну похибку оцінки енергії, що споживає окремо виконана інструкція або між-інструкційний перехід, яка виникає через те, що МК працює в умовах постійної значної зміни напруги живлення (0,6 В, тобто 12%). Ця методична похибка буде матиме випадковий характер, а це ускладнює досягнення високої точності побудови

математичних моделей споживання енергії МК і, тим самим, створення відповідних засобів оцінки енергії виконання ним заданої програми.

Найбільш досконалим є метод вимірювання миттєвої потужності МК, запропонований у [96-98]. Схема пристрою, який реалізує цей метод, представлена на рис. 1.7. Основними ідеями цього методу вимірювання миттєвого струму споживання МК (або інших імпульсних споживачів) є, по-перше, використання конденсатора C в колі живлення МК як вимірювального перетворювача струму споживання МК в напругу на ньому, і, по-друге, живлення МК не від джерела напруги, а від джерела (стабілізатора) струму CC . Вимірювання проводяться двома каналами $K1$ і $K2$ цифрового осцилографа $ЦО$. В схему входить також високочастотний еквівалент стабілітрона (на операційному підсилювачі $ОП$, діоді $Д$ та резисторі R), що захищає МК від перевищення напругою на C допустимого значення. Напруга спрацювання $ОП$ задається стабілізатором напруги $СН$.

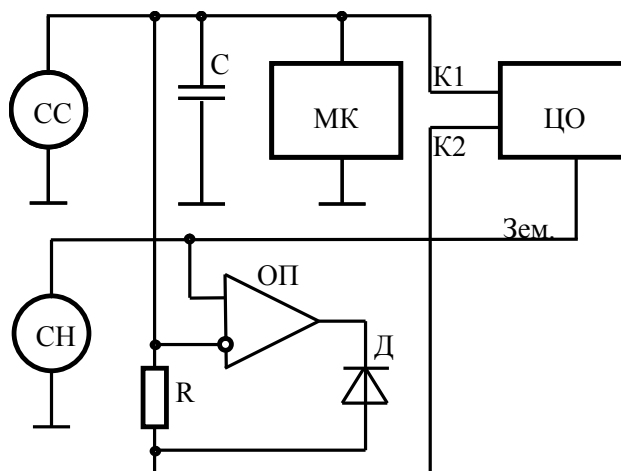


Рисунок 1.7 – Структурно-принципова схема пристрою вимірювання миттєвого струму споживання МК

Робота конденсатора C в колі живлення МК як вимірювального перетворювача струму споживання МК в напругу на ньому базується на широко відомій залежності [80] напруги на конденсаторі від струмів його

заряду або розряду (при заряді напруга на конденсаторі зростає, при розряді падає)

$$\Delta U_C = \frac{I_C \cdot t}{C}, \quad (1.7)$$

де ΔU_C – зміна напруги на конденсаторі;

I_C – струм заряду або розряду конденсатора;

t – час заряду або розряду;

C – ємність конденсатора.

Для достатньо точного визначення миттєвої потужності споживання МК частоту тактового генератора досліджуваного МК вибирають в 10...20 разів меншою за максимальну частоту дискретизації цифрового осцилографа [12-15]. Через те, що за період тривання одного імпульсу тактового генератора МК проходить велика кількість перетворень АЦП цифрового осцилографа, енергію виконання МК окремих інструкцій можна оцінити як суму елементарних енергій, спожитих цим МК за час виконання інструкції

$$E_{INS} = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (1.8)$$

де E_{INS} – енергія виконання МК окремих інструкцій;

E_i – елементарні енергії, спожиті МК за час перетворення аналого-цифрового перетворювача цифрового осцилографа;

n – відношення часу виконання досліджуваної інструкції до часу перетворення аналого-цифрового перетворювача цифрового осцилографа.

Кількість n елементарних енергій E_i при сумуванні визначається періодом імпульсів тактового генератора МК та часом перетворення аналого-

цифрового перетворювача цифрового осцилографа. При виконанні інструкції за один такт (що характерне для RISC процесорів, до яких належить ARM7TDMI)

$$n = T_{CLK} / \Delta t, \quad (1.9)$$

де T_{CLK} – період імпульсів тактового генератора МК;

Δt – час перетворення АЦП цифрового осцилографа.

Час Δt перетворення АЦП цифрового осцилографа в свою чергу можна визначити за частотою дискретизації цифрового осцилографа [91]

$$\Delta t = 1 / F_{MAX}, \quad (1.10)$$

де F_{MAX} – частота дискретизації АЦП цифрового осцилографа (для підвищення точності визначення енергії виконання МК окремих інструкцій частоту дискретизації АЦП слід вибирати максимально можливою для даного цифрового осцилографа).

Значення елементарної енергії E_i можна визначити як добуток потужності, яку споживає МК під час i – того перетворення аналого-цифрового перетворювача цифрового осцилографа на час перетворення АЦП цифрового осцилографа

$$E_i = P_i \cdot \Delta t, \quad (1.11)$$

де P_i – потужність, яку споживає МК під час i – того перетворення АЦП.

В свою чергу потужність P_i , яку споживає МК під час i – того перетворення можна визначити як добуток результатів вимірювання поточної напруги живлення МК та середнього струму його споживання за час перетворення АЦП цифрового осцилографа [80]

$$P_i \approx U_i \cdot I_i, \quad (1.12)$$

де U_i – поточна напруга живлення МК (вимірюється за допомогою першого каналу цифрового осцилографа як відхилення від вихідної напруги СН);

I_i – середній струм споживання МК за час Δt .

В даному випадку споживана потужність апроксимується за методом прямокутників, що веде до того, що рівність (1.12) носить приблизний характер. Однак відносно велика кількість результатів окремих вимірювань веде до того, що відхилення визначеної потужності на обох фронтах імпульсів взаємно компенсуються та усереднюються. Тому похибкою, викликаною приблизним характером рівності (1.12) можна нехтувати.

Основними перевагами схеми рис. 1.7 є:

1. Робота МК у нормальному (штатному) режимі – у колі живлення МК є високочастотний конденсатор. Це виключає похибки вимірювання, викликані збоями МК, значними змінами напруги його живлення тощо;
2. Можливість строгого контролю балансу струмів, які втікають та витікають в колі живлення МК, що дає можливість на основі першого закону Кірхгофа [75, 80] записати співвідношення

$$I_{CC} = I_{МК} \pm I_C + I_R + I_{K1}, \quad (1.13)$$

де I_{CC} – струм джерела живлення (стабілізатора струму);

$I_{МК}$ – струм споживання МК;

I_C – струм заряду / розряду конденсатора С, що визначається згідно (1.7) за зміною напруги на ньому, яка вимірюється цифровим осцилографом;

I_R – струм схеми захисту, який протікає через резистор R ;

I_{K1} – вхідний струм цифрового осцилографа (малий, ним можна нехтувати).

3. Необхідні для роботи зміни напруги на МК не перевищують 50 мВ [96-99], тобто 1% від напруги його живлення, що практично виключає похибку результату вимірювання від зміни напруги на МК;
4. Захист від перевищення напруги на МК (під час пониженого споживання струму МК конденсатор С заряджається і сприймає надлишок струму, тому напруга на ньому може зростати вище допустимої для МК) реалізовано на високочастотному еквіваленті стабілітрона (операційний підсилювач ОП, діод Д і резистор R) [90], тому його еквівалентна ємність не перевищує декількох десятків пФ [74] – нею можна нехтувати;
5. Напруга спрацювання захисту МК задається вихідною напругою стабілізатора напруги СН і може довільно змінюватися [99];
6. Цифровий осцилограф працює у диференціальному режимі [99] – він вимірює лише відхилення напруги живлення МК від номінальної (вихідної напруги СН), що забезпечує чутливість 200 мкВ при використанні 8-ми розрядного цифрового осцилографа (похибка дискретності 0,004%);
7. Не дивлячись на те, що для забезпечення роботи цифрового осцилографа у диференційному режимі, його землю необхідно було підключити до виходу стабілізатора напруги СН, у схемі рис. 1.7 практично не збільшився загальний рівень завад, зокрема, загального виду [91]. Це пов'язано з тим, що на виході стабілізатора СН ввімкнено конденсатор великої ємності 2000 мкФ, реактивний опір якого на частоті завади 50 Гц не перевищує 1,5 Ома, тобто по змінному струму цифровий осцилограф практично заземлений [99].
8. Похибки всіх елементів вимірювального каналу можна легко коригувати. У [99, 100] розроблена методика, згідно якої прецизійним цифровим тестером вимірюють вихідні напругу СН та струм СС, а також опір резистора R, крім того, знаходять коефіцієнти корекції похибки каналів цифрового осцилографа. Далі, за допомогою імітатора імпульсного споживача (тобто МК), опори якого також виміряні цифровим тестером, знаходять ємність конденсатора С в колі живлення МК. В результаті стають відомі індивідуальні параметри всіх елементів схеми рис. 1.7. Таким чином,

похибка результату обчислення миттєвої потужності споживання МК, згідно [99, 100], не перевищує 0,75%.

Як видно з перелічених вище переваг схеми рис. 1.7, вона забезпечує високу точність вимірювання миттєвого струму споживання МК та обчислення його миттєвої потужності споживання при коректній експлуатації МК (він працює у нормальному, штатному режимі). Такі властивості схеми рис. 1.7 дають змогу використати її як основу інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для визначення (як шляхом вимірювання, так і шляхом прогнозу за допомогою НМ) миттєвої енергії споживання МК при виконанні інструкцій.

Таким чином, у даному параграфі розглянуто методи вимірювання миттєвої потужності споживання МК та виявлено найкращий з них, на основі якого у [99] побудовано інформаційно-вимірювальну систему.

1.4 Інформаційно-вимірювальна система миттєвого енергоспоживання мікроконтролерів

У попередньому параграфі виявлено найкращий метод вимірювання миттєвого енергоспоживання МК (реалізований у схемі рис. 1.7), на основі якого у [99] побудовано ІВС миттєвої потужності та енергії споживання МК. Основними функціями такої ІВС є:

1. Розробка тестових програм, які дозволять провести експериментальне визначення енергії виконання МК початкового обмеженого набору інструкцій та між-інструкційних переходів;
2. Експериментальне визначення миттєвого струму споживання МК при виконанні початкового обмеженого набору інструкцій та між-інструкційних переходів;

3. Обчислення миттєвої потужності та енергії споживання МК при виконанні початкового обмеженого набору інструкцій та між-інструкційних переходів;
4. Корекція результатів вимірювання миттєвої потужності та енергії споживання МК при виконанні початкового обмеженого набору інструкцій та між-інструкційних переходів згідно індивідуальних параметрів елементів схеми рис. 1.7, визначених безпосередньо перед початком експериментальних досліджень МК;
5. Накопичення результатів експериментальних досліджень;
6. Навчання на результатах експериментальних досліджень НМ для прогнозування енергії виконання не досліджених інструкцій;
7. Прогнозування енергії виконання МК тих інструкцій та між-інструкційних переходів, які не були експериментально досліджені;
8. Побудова математичних моделей енергоспоживання МК;
9. Оцінка похибок побудованих математичних моделей енергоспоживання МК;
10. Відбір математичних моделей енергоспоживання МК, які забезпечують достатню точність оцінки енергоспоживання реальних програм або їх фрагментів;
11. Виявлення недостатньо точних математичних моделей;
12. Аналіз причин недостатньої точності побудованих математичних моделей та планування додаткових експериментальних досліджень;
13. Написання програм, які забезпечують додаткові експериментальні дослідження та програмування МК.

Слід відзначити, що ІВС на базі схеми рис. 1.7 забезпечує високу точність визначення миттєвого струму споживання МК та обчислення його миттєвої потужності споживання – похибка вимірювання, згідно [99, 100], не перевищує 0,75%. Також ІВС забезпечує високу точність визначення енергії виконання окремих інструкцій – 0,75% для тих інструкцій, енергоспоживання яких дійсно досліджувалося експериментально та не більше 3% для тих інструкцій,

енергоспоживання яких прогнозувалося за допомогою НМ, навчених на результатах експериментальних досліджень, отриманих за допомогою цієї ІВС [101-104].

Крім цього, як вже було вказано, МК у схемі рис. 1.7 працює у нормальному (штатному) режимі, тобто результати визначення енергії виконання інструкцій цілком адекватні енергії їх виконання у реальних системах на базі досліджених МК.

Однак ІВС [99, 100] притаманні також деякі недоліки. Першим з них є низька завадостійкість. Це пов'язано з принципом дії вимірювальної схеми – вимірюванням миттєвих значень. Таким чином всі наведені на входи К1 і К2 цифрового осцилографа завади (особливо високочастотні) впливають на результати вимірювання миттєвого струму споживання МК. Забезпечення високої завадостійкості результатів вимірювання, отриманих цифровим осцилографом, вимагає значного обсягу результатів вимірювання, тому обчислювальна та часова складність такого шляху дуже велика. Тому завадостійкі методи вимірювання енергоспоживання МК не повинні базуватися на цифровому осцилографі.

Другим недоліком ІВС [99, 100] на базі схеми рис. 1.7 є накопичення похибки при дослідженні енергоспоживання набору інструкцій. Така задача виникає при дослідженні енергоспоживання складних команд, програм або їх фрагментів. Накопичення проявляє себе як зростання розходження оцінки значення енергоспоживання набору інструкцій (одних і тих самих або різних) при обчисленні (сумуванні) енергії виконання інструкцій та при вимірюванні сумарного значення енергії за допомогою ІВС. Метою дослідження наборів інструкцій є оцінка результатів оптимізації програмного забезпечення, тому накопичення похибки не дає можливості достовірно оцінити ці результати. Причина накопичення не достатньо вивчена. Однак зрозуміло, що при вимірюванні енергоспоживання МК не як суми енергій виконання окремих інструкцій, а як єдиного інтегралу споживання енергії МК за час виконання

заданого набору інструкцій процес накопичення не буде проходити та не буде впливати на результат вимірювання енергоспоживання.

Таким чином, у даному параграфі розглянуто найкращу ІВС миттєвої потужності та енергії споживання МК, виявлено її переваги та недоліки.

1.5 Шляхи підвищення точності вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів

Як видно з проведеного вище аналізу, деякі переваги мають як методи вимірювання миттєвої потужності споживання МК, так і методи вимірювання середньої потужності його споживання. Такий стан робить доцільним поєднання обох методів для їх взаємного порівняння та доповнення. Поєднання повинно привести до створення можливості використання переваг кожного з методів при можливому усуненні впливу їх недоліків на результати експериментальних досліджень. Тому доцільним є поєднання цих методів у рамках єдиної інтегрованої ІВС енергоспоживання МК.

Як основу для такої єдиної інтегрованої ІВС доцільно використати розроблену у [99] та описану у попередньому параграфі ІВС миттєвої потужності споживання МК. Така інтегрована ІВС повинна передбачати можливість вимірювання як енергії виконання окремих інструкцій, так і складних команд, програм і їх фрагментів. При цьому повинна бути забезпечена як висока точність вимірювання обох видів енергоспоживання, так і висока завадостійкість, зокрема, за рахунок малої похибки порівняння результатів вимірювання обох видів енергії. При цьому необхідно уникнути зміни схеми ввімкнення та режиму роботи МК при вимірюванні різних видів енергоспоживання для усунення впливу цих змін на результат вимірювання енергоспоживання МК.

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 задачі:

1. провести аналіз відомих методів і засобів вимірювання енергоспоживання 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 ці дослідження;
4. розробити архітектуру інформаційно-вимірювальної системи енергоспоживання МК;
5. розробити апаратне та програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи енергоспоживання МК та провести аналіз її похибок.

Проведений у попередніх параграфах аналіз дає змогу сформулювати основні правила, згідно яких повинна бути синтезована пропонована ІВС:

1. Для забезпечення високої стійкості до завад і виявлення методичних похибок, канали середнього та миттєвого енергоспоживання повинні мати різні принципи дії.
2. Для забезпечення високої стійкості до завад канал середнього енергоспоживання має базуватися на інтегруючих методах аналого-цифрового перетворення. Зокрема, доцільне використання одного з найбільш точних і завадостійких методів аналого-цифрового перетворення – двохтактного інтегрування.
3. Досліджуваний МК повинен працювати в штатному режимі як при вимірюванні миттєвого, так і середнього енергоспоживання. При цьому зміни у схемі живлення досліджуваного МК повинні бути настільки незначними, що повинна існувати змога порівняння результатів

визначення миттєвого і середнього енергоспоживання.

4. Похибка порівняння результатів вимірювання середнього та миттєвого енергоспоживання має бути меншою за похибки самих результатів вимірювання.

Таким чином, в даному параграфі показано доцільність побудови ІВС, у якій буде поєднано методи вимірювання середнього та миттєвого енергоспоживання МК з метою використання їх переваг та усунення їх недоліків. Сформульовано основні правила, згідно яких повинна бути синтезована пропонована ІВС.

Висновки до розділу 1

1. аналіз характеру енергоспоживання МК показав, що, у зв'язку з їх виготовленням за КМОН технологією, вони споживають струм у вигляді імпульсів, які синхронні із фронтами імпульсів тактового генератора та мають амплітуду у сотні разів більшу, ніж середній струм споживання.
2. аналіз відомих методів дослідження енергоспоживання МК показав, що існують два напрями вимірювання енергоспоживання – вимірювання миттєвих значень (зокрема, миттєвого струму споживання з періодом у 10 ... 20 разів меншим за час виконання однієї інструкції) та вимірювання середніх значень (зокрема, за час виконання багатьох сотень інструкцій, програми в цілому або фрагмента програми).
3. аналіз відомих методів вимірювання середнього енергоспоживання показав, що вони не забезпечують високу точність вимірювання або за рахунок неконтрольованого обміну енергією між МК та конденсатором у колі живлення МК, або через високу імовірність збоїв МК при проведенні вимірювань.

4. аналіз відомих методів вимірювання миттєвого енергоспоживання показав, що серед них високу точність вимірювання забезпечує лише один метод, на базі якого створена ІВС миттєвого енергоспоживання МК, яка має недостатню завадостійкість та схильна до накопичення похибки при вимірюванні програм та їх фрагментів.
5. прийнято рішення про доцільність побудови ІВС, у якій буде поєднано методи вимірювання середнього та миттєвого енергоспоживання МК з метою використання їх переваг та усунення їх недоліків. Сформульовано основні правила, згідно яких повинна бути синтезована пропонована ІВС.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СЕРЕДНЬОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

2.1 Теоретичні основи методів вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів

Як було показано у першому розділі, відомі методи вимірювання як миттєвого, так і середнього значення енергоспоживання МК мають доволі суттєві недоліки. При цьому метод і пристрій, запропоновані у [96-99], має найменше недоліків. Тому його доцільно використати як основу для подальшого вдосконалення. Слід відзначити, що всі методи вимірювання миттєвого значення фізичних величин, енергоспоживання МК в тому числі, мають низьку завадостійкість. Підвищити завадостійкість можна за рахунок цифрової фільтрації, так як це робилося у [99], однак там боротьба велася з високочастотним шумом, тому цифрова фільтрація зводилася до усереднення дев'яти результатів вимірювання, отриманих цифровим осцилографом. Однак методи цифрової фільтрації при боротьбі із завадами мережі живлення 50 Гц (період $2 \cdot 10^{-2}$ с) у випадку використання пристрою [96] не є виправданими – вимагають оброблення великих масивів даних. Наприклад, цифрові фільтри на базі трикутної функції для ефективного пригнічення завад вимагають від трьох до п'яти періодів завади. А при частоті дискретизації цифрового осцилографа 100 МГц (період 10^{-8} с), прийнятого при реалізації пристрою [96-99], кількість результатів вимірювання буде складати $2 \cdot 10^{-2}$ с / 10^{-8} с = $2 \cdot 10^6$ тільки за один період. Оброблення таких масивів даних для виконання цифрової фільтрації є доволі складною та трудомісткою задачею, яка, зокрема, вимагає багато часу. Тому цифрову фільтрацію при визначенні середнього енергоспоживання МК використовувати недоцільно.

Крім того, як вже було вказано раніше, при вимірюванні за допомогою пристрою [96-99] наборів інструкцій або команд (тобто програм в цілому або їх фрагментів) виникає накопичення похибок. Це може бути пов'язано із відсутністю чіткої синхронізації між частотами тактових генераторів цифрового осцилографа та досліджуваного МК.

Тому підвищення точності та завадостійкості при розробленні методів вимірювання середнього енергоспоживання МК будемо базувати на використанні інтегруючих методів аналого-цифрового перетворення. Ці методи використовують одну з основних властивостей синусоїди [75]

$$\int_0^{nT} \sin(t) dt = 0, \quad (2.1)$$

де t – поточний час інтегрування;

T – період функції \sin ;

n – кількість періодів, за які проходить інтегрування.

Одними з найбільш точних, чутливих і завадостійких є АЦП двохтактного інтегрування [91]. Саме тому доцільно використати їх у системі вимірювання середнього енергоспоживання МК.

У схемі рис. 1.7 [96] основне рівняння балансу струмів у колі живлення МК записано на основі першого закону Кірхгофа

$$I_{REFI} = I_{МК} \pm I_C + I_R, \quad (2.2)$$

де I_{REFI} – струм стабілізатора струму живлення МК;

$I_{МК}$ – струм споживання МК;

$\pm I_C$ – струм заряду або розряду конденсатора C в колі живлення МК;

I_R – струм еквівалента стабілітрона, що захищає МК від перевищення напругою живлення допустимої межі.

При вимірюванні енергоспоживання доцільно перейти до балансу споживаної енергії. На основі (2.2) можна записати

$$E_{REFI} = E_{MK} \pm E_C + E_R + E_{VYM}, \quad (2.3)$$

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, спожита еквівалентом стабілітрона, під час захисту МК від перевищення напругою живлення допустимої межі;

E_{VYM} – енергія, спожита вимірювальними колами, вона мала, нею можна нехтувати.

Енергії спожиті вимірювальними колами малі порівняно з переліченими, ними можна нехтувати. Енергію, накопичену або віддану конденсатором С, можна, згідно [80], визначити як

$$E_C = (C \cdot U_C^2) / 2, \quad (2.4)$$

а її зміну – як

$$\Delta E_C = (C \cdot \Delta U_C^2) / 2, \quad (2.5)$$

де E_C , ΔE_C – енергія, накопичена конденсатором С, та її зміна;

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

Якщо закінчити процес вимірювання середнього енергоспоживання МК коли зміна напруги на конденсаторі С прямує до нуля, тобто

$$\Delta U_C \rightarrow 0, \quad (2.6)$$

то і вплив енергії конденсатора C на результат вимірювання буде прямувати до нуля, тобто $\Delta E_C \rightarrow 0$. В такому випадку (2.3) можна спростити

$$E_{REFI} = E_{MK} + E_R, \quad (2.7)$$

Як відомо [80], імпульсну енергію можна визначити згідно формули

$$E = \int_{t=0}^T u \cdot i \cdot dt, \quad (2.8)$$

де u – миттєве значення напруги на контактах живлення споживача (МК);

i – миттєве значення струму через контакти споживача (МК);

t – поточне значення часу;

T – час, за який вимірюють енергію.

Однак, для вимірювання середнього енергоспоживання МК реалізація (2.8) зводиться до сумування добутків миттєвих значень u та i , а це повторить всі недоліки схеми рис. 1.7 [96]. Таким чином доцільно підставити (2.8) у (2.7), перетворивши (2.8) так, щоби при вимірюванні позбутися необхідності сумування добутків миттєвих значень u та i .

Таким чином, основна ідея запропонованого в [105-109] методу полягає в тому, що, якщо живити досліджуваний імпульсний споживач (МК) від джерела струму (а не традиційно, від джерела напруги) та забезпечити рівність нулю зміни інтеграла поточної напруги u , тобто забезпечити

$$\int_0^T (u - U_{REF}) dt \rightarrow 0, \quad (2.9)$$

то (2.8) можна спростити

$$E_{REF} = \int_{t=0}^T u_{REF} \cdot i_{REF} \cdot dt \approx U_{REF} \int_{t=0}^T i_{REF} \cdot dt, \quad (2.10)$$

Крім того, поточний струм i_{REF} формується стабілізатором струму, тому $i_{REF} = I_{REF} = const$. В такому випадку (2.10) можна ще спростити

$$E_{REF} \approx U_{REF} \int_{t=0}^T i_{REF} \cdot dt = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T, \quad (2.11)$$

Підставивши (2.11) у (2.7), отримаємо

$$E_{MK} = E_{REFI} - E_R \approx U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T - E_R, \quad (2.12)$$

В свою чергу енергія, спожита еквівалентом стабілітрона, під час захисту МК від перевищення напругою живлення допустимої межі E_R може бути визначена

$$E_R = \int_{t=0}^T u_{MK} \cdot i_R \cdot dt = \int_{t=0}^T u_{MK} \frac{u_R}{R} dt, \quad (2.13)$$

де $u_{MK} = u$ – миттєве значення напруги на контактах живлення МК;

u_R – миттєве значення напруги на резисторі R в колі еквівалента стабілітрона.

Якщо виконується умова (2.9), а відхилення u_{MK} від U_{REF} малі (згідно [96, 99] не перевищують 1%), то можна вважати, що $u_{MK} \approx U_{REF}$, тоді константи можна вивести з під інтеграла. В результаті отримаємо

$$E_R = \int_{t=0}^T u_{MK} \frac{u_R}{R} dt \approx \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R dt, \quad (2.14)$$

Підставивши (2.14) у (2.12), отримаємо [105-109]

$$E_{MK} = E_{REFI} - E_R \approx U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T - \frac{U_{REF}}{R} \int_0^T u_R dt, \quad (2.15)$$

Таким чином, послідовні спрощення (2.3) привели до того, що у (2.15) входять лише інтегральні значення напруги опорного стабілізатора, струму стабілізатора струму, часу вимірювання та опору постійного резистора, а також значення інтегралу спаду напруги на резисторі. Всі перелічені значення можна виміряти за допомогою АЦП двохтактного інтегрування, що забезпечить високу завадостійкість системи.

Слід відзначити, що спрощення, проведені згідно накладених умов $\Delta U_C \rightarrow 0$, $u_{MK} \approx U_{REF}$, а також (2.9) ведуть до відповідного ускладнення схеми та появи методичних похибок. Тому методичні похибки, які виникають при використанні (2.15) для побудови вимірювальних схем пристроїв або систем вимірювання середнього енергоспоживання МК, повинні бути досліджені перед тим, як буде прийнято рішення про допустимість їх використання.

Таким чином, у даному параграфі проведено теоретичні дослідження процесу вимірювання середнього енергоспоживання МК, показано, що, за рахунок відповідного спрощення математичних виразів, можна реалізувати нові методи вимірювання середнього енергоспоживання МК, які будуть характеризуватися спрощеною схемою вимірювального каналу, використанням як бази схеми вимірювання миттєвого енергоспоживання МК, дадуть змогу забезпечити високу точність результату вимірювання (яка фактично буде визначатися похибками прецизійних вольтметра та амперметра постійного

струму) та високу завадостійкість (за рахунок створення можливості використання завадостійких АЦП двотактного інтегрування).

2.2 Метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів

Відповідно до (2.15) енергію, яку споживає МК за час T проведення вимірювання, можна визначити знаючи напругу U_{REF} опорного стабілізатора напруги (її можна виміряти прецизійним цифровим вольтметром постійного струму, що реалізує метод двотактного інтегрування), струм I_{REF} стабілізатора струму (його можна виміряти прецизійним цифровим амперметром постійного струму, що реалізує метод двотактного інтегрування), час T проведення вимірювання (його можна виміряти цифровим лічильником, на який поступають імпульси кварцового генератора з виміряною прецизійним частотоміром частотою), опір R резистора, ввімкненого послідовно з еквівалентом стабілітрона (його можна виміряти прецизійним цифровим омметром постійного струму, що реалізує метод двотактного інтегрування) та інтеграл спаду напруги на цьому резисторі. Під час виконання самого експериментального визначення необхідно виміряти лише інтеграл спаду напруги на резисторі R . Для такого вимірювання теж доцільно використати метод двотактного інтегрування – один з найточніших та найбільш завадостійких методів аналого-цифрового перетворення [91].

Як вже було відзначено, як основа схеми вимірювання середнього енергоспоживання МК буде використана модифікована відповідним чином схема вимірювання миттєвого енергоспоживання МК (рис. 1.7). Узагальнена структурна схема вимірювальних каналів такої модифікованої системи подана на рис. 2.1 [105-109]. Вона складається з досліджуваного мікроконтролера МК, що живиться від стабілізатора струму СС. До виходу СС підключено також конденсатор C та еквівалент стабілітрона (на базі операційного підсилювача

ОП та діода Д). В схему також введено опорний стабілізатор напруги СН та резистор R (ввімкнений послідовно з еквівалентом стабілітрона). Всі перелічені елементи схем реалізації методів [96] і [105] співпадають. Відрізняється схема методу [105] від [96] тим, що цифровий осцилограф, для виконання умови (2.9), замінено підсистемами регулювання РСС струму стабілізатора струму СС, а також введено канал вимірювання ВИМ інтегралу спаду напруги на резисторі R та компаратор КП, що фіксує моменти рівності нулю різниці напруги на конденсаторі C і напруги стабілізатора напруги СН, тобто моменти виконання умови (2.6).

Під час дослідження в пам'ять програми МК записують підпрограму його ініціалізації та послідовність інструкцій, середнє енергоспоживання яких досліджують (це може бути як багатократно повторена одна з інструкцій, так і команда, досліджувана програма в цілому або її фрагмент). Робота системи проходить в два етапи – налаштування і саме вимірювання. Перший етап починається подачею сигналу початку виконання досліджуваних інструкцій. В цей момент досліджуваний МК видає імпульс запуску на підсистеми РСС та ВИМ. РСС починає інтегрувати відхилення напруги живлення МК від напруги СН (остання рівна номінальній напрузі живлення МК).

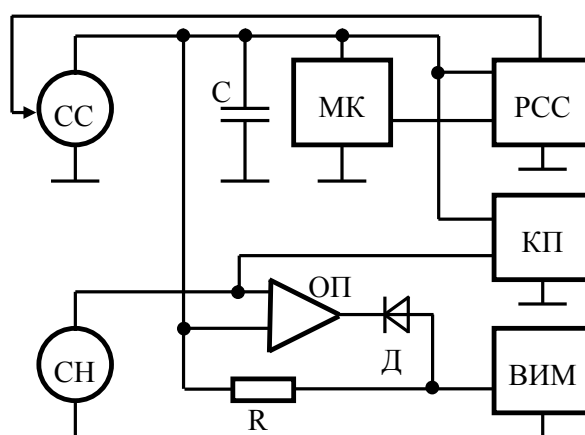


Рисунок 2.1 – Структура системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

Якщо абсолютне значення інтегралу відхилення напруги живлення МК від напруги СН перевищує допустиме значення (методичну похибку від цього

відхилення необхідно буде дослідити) то РСС змінює струм стабілізатора СС таким чином, щоби наблизити абсолютне значення інтегралу до нуля.

Якщо абсолютне значення інтегралу відхилення напруги живлення МК від напруги СН не перевищує допустиме значення, то фіксується результат вимірювання каналу ВІМ, який входить у рівняння (2.15) обчислення середнього енергоспоживання МК. Поточне значення напруги СН, струму СС та опору резистора R , що входять у рівняння (2.15), визначаються за допомогою прецизійного тестера.

Час вимірювання T визначається співпаданням обмежень [110]:

1. (2.6) – зміна напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не повинна перевищувати допустиме значення, за цим слідкує компаратор КП;
2. (2.9) – зміна інтеграла напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не повинна перевищувати допустиме значення, за цим слідкує РСС.

Крім того, до часу вимірювання T ставляться наступні вимоги [110]:

1. час вимірювання T не повинен бути меншим деякого значення, згідно якого розраховано елементи вимірювальної схеми;
2. час вимірювання T також не повинен бути також більшим деякого значення, згідно якого розраховано елементи вимірювальної схеми;
3. час вимірювання T повинен бути кратним багатократному повторенню досліджуваної інструкції, команді, програмі в цілому або її фрагмента для того, щоби можна було визначити енергію її виконання як частку від ділення обчисленої енергії на кількість циклів виконання інструкції (інакше незрозуміло енергоспоживання чого ми досліджуємо);
4. час вимірювання T повинен бути кратним періоду мережі живлення 50 Гц (період 0,02 с) для забезпечення пригнічення завад при використанні АЦП двохтактного інтегрування.

За виконанням перелічених вище чотирьох умов повинен слідкувати пристрій керування вимірювальними каналами системи (на схемі рис. 2.1 не показаний). Після виконання перелічених умов обчислювальний пристрій, що входить у пристрій керування (його найкраще виконати на окремому МК),

розраховує значення спожитої енергії при виконанні досліджуваної інструкції, команди, програми в цілому або її фрагмента згідно (2.15).

Запропонований у [105-109] метод реалізує система виміру середнього енергоспоживання МК, структурно-принципова схема якої подана на рис. 2.2. Вона складається з досліджуваного мікроконтролера МК, що живиться від стабілізатора струму СС. До СС підключено прецизійний цифровий амперметр постійного струму A , конденсатор C , ключ K та еквівалент стабілітрона на базі операційного підсилювача ОП та діода D . В схемі також є опорний стабілізатор напруги СН, резистор R , ввімкнений послідовно з еквівалентом стабілітрона, прецизійний вольтметр постійного струму V , а також система регулювання РСС струму стабілізатора струму СС, канал вимірювання ВІМ інтегралу спаду напруги на резисторі R та обчислювальний пристрій. Останній найдоцільніше реалізувати на МК, його функціями, крім управління пристроями, що входять у систему рис. 2.2, повинні бути віднімання $\bar{\Sigma}$ та перемноження $X1$ та $X2$.

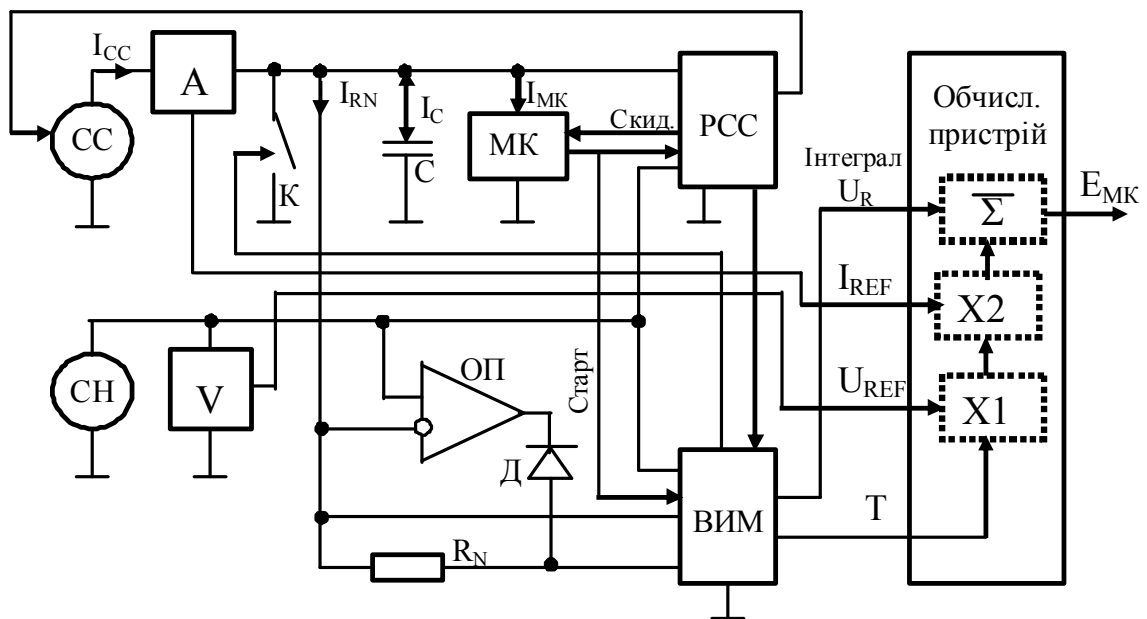


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

Крім того, в схему входить компаратор, який відслідковує виконання умови (2.6), він фактично не пов'язаний із вузлами системи, поданої на рис. 2.2, тому він на схемі рис. 2.2 не показаний.

Під час дослідження енергоспоживання мікроконтролера МК в його пам'ять програми записують підпрограму його самоналаштування (встановлення потрібного режиму роботи своїх вузлів) та послідовність інструкцій, середнє енергоспоживання яких досліджують (це може бути як багатократно повторена одна з інструкцій або команд, так і досліджувана програма в цілому або її фрагмент). Робота схеми починається подачею сигналу початку роботи на МК системи керування, яка після відповідної підготовки власних вузлів, посилає на МК імпульс скидання Скид., який ініціює початок роботи системи.

Досліджуваний МК спочатку виконує налаштування своїх вузлів (встановлює потрібні при данім дослідженні режими їх роботи). Перед початком виконання саме досліджуваної інструкції (програми), досліджуваний МК посилає регулюючій РСС та вимірювальній ВІМ підсистемам сигнал або код старту дослідження. Система регулювання РСС починає інтегрувати відхилення напруги живлення МК від напруги СН (остання рівна номінальній напрузі живлення досліджуваного МК). Після виконання перелічених вище умов закінчення вимірювання система регулювання РСС відключає свій вхід від напруги живлення досліджуваного МК та вимірює відхилення інтегралу відхилення напруги живлення досліджуваного МК від напруги СН. Якщо відхилення напруги живлення досліджуваного МК від номінальної не рівне нулю (перевищує допустиме значення), то система регулювання РСС змінює струм стабілізатора струму СС так, щоби наблизити зміну напруги в колі живлення досліджуваного МК за час виконання вимірювання до нуля. В подальшому система регулювання РСС скидає досліджуваний МК і описаний процес налаштування повторюється. За декілька ітерацій відхилення напруги живлення досліджуваного МК від номінальної стане близьким до нуля (не буде перевищувати допустиме значення). Тоді система регулювання РСС дає

команду обчислювальному пристрою про виконання умови (2.6). Якщо виконані всі інші перелічені вище умови, то обчислювальний пристрій дає команди на зчитування та запам'ятовування даних вимірювального каналу ВИМ (результату вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R за час вимірювання T) та значення часу вимірювання T (рівного також тривалості першого такту інтегрування АЦП двохтактного інтегрування, що входить у ВИМ). Далі обчислювальний пристрій замикає ключ K та запускає прецизійні амперметр і вольтметр постійного струму і зчитує результати їх вимірювання. На їх основі обчислювальний пристрій, згідно (2.15), обчислює значення спожитої середньої енергії. На цьому процес дослідження енергоспоживання даної інструкції, команди, програми або її фрагмента закінчується.

Слід відзначити, що висока точність результатів вимірювання енергоспоживання інструкції, команди, програми або її фрагмента визначається багатьма факторами:

1. Похибками вимірювання напруги U_{REF} опорного стабілізатора напруги СН, струму I_{REF} стабілізатора струму СС, часу вимірювання T . Ці похибки є інструментальними, вони визначаються похибками апаратних засобів – прецизійних цифрових вольтметра та амперметра, а також похибками АЦП двохтактного інтегрування вимірювального каналу ВИМ і його кварцового генератора, при вимірюванні тривалості першого такту інтегрування;
2. Похибками, які визначаються неточним виконанням перелічених вище умов закінчення часу вимірювання T . Ці похибки є методичними, вони не залежать від похибок засобів вимірювання напруги U_{REF} опорного стабілізатора напруги СН, струму I_{REF} стабілізатора струму СС, часу вимірювання T .

Для зменшення інструментальних похибок доцільно зменшити у результаті вимірювання енергії вплив похибки АЦП двохтактного інтегрування вимірювального каналу ВИМ. Для цього у рівності (2.15) необхідно створити умови, коли

$$U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T \gg \frac{U_{REF}}{R} \int_0^T u_R dt, \quad (2.16)$$

Для цього слід так підібрати ємність конденсатора C в колі живлення досліджуваного МК, щоби схема захисту від перевищення напругою на досліджуваному МК допустимого значення спрацьовувала рідко та вмикалася на відносно короткий час. У такому випадку $u_R \rightarrow 0$, а значить $\int_0^T u_R dt \rightarrow 0$, тобто умова (2.16) буде безумовно виконуватися. Однак тоді можливий випадок, коли зміни напруги в колі живлення досліджуваного МК будуть надто великі, тому при вимірюванні енергоспоживання досліджуваного МК необхідно слідкувати за миттєвими значеннями напруги на досліджуваному МК. Для цього можна використати цифровий осцилограф, однак таке рішення вимагає наступного аналізу великого обсягу кодів результатів вимірювання напруги на МК. Крім того, можлива (а навіть дуже імовірна) необхідність кількаразової зміни ємності конденсатора C в колі живлення досліджуваного МК, що значно підвищує трудомісткість дослідження та вимагає постійної уваги оператора, що проводить дослідження. Тому була запропонована також вимірювальна схема [111, 112], яка дає змогу автоматизувати дослідження енергоспоживання МК.

Таким чином, у даному параграфі запропоновано структурну схему вимірювального каналу системи вимірювання середнього енергоспоживання МК [105-109], де реалізовано розглянуті в попередньому параграфі методи забезпечення високої точності результату вимірювання (яка фактично визначається похибками прецизійних вольтметра та амперметра постійного струму) та високу завадостійкість (за рахунок створення можливості використання завадостійких АЦП двохтактного інтегрування).

2.3 Метод автоматичного вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів

У § 2.2 було вказано на основний недолік запропонованої у цій параграфі структурної схеми системи вимірювання середнього енергоспоживання МК – необхідність підбору ємності конденсатора в колі живлення досліджуваного МК. Однак процес підбору цього конденсатора можна автоматизувати. Для цього слід використати магазин конденсаторів. Слід відзначити, що стандартні магазини конденсаторів, по-перше, є дуже складними і дорогими пристроями, а по-друге, не передбачають кодове керування, тобто практично не придатні для використання у автоматизованій системі вимірювання середнього енергоспоживання МК [111, 112]. Однак вимоги до потрібного магазину конденсаторів, крім кодового керування, достатньо невисокі:

1. Діапазон зміни ємності магазину конденсаторів невеликий, адже діапазон зміни енергії виконання інструкцій доволі вузький. Попередні розрахунки показують, що діапазон зміни ємності магазину конденсаторів для вимірювання середнього енергоспоживання сучасних МК не повинен перевищувати 30 нФ ... 3 мкФ;
2. Похибка магазину конденсаторів може бути доволі велика, адже ємність конденсатора в колі живлення досліджуваного МК не входить у рівняння (2.15), згідно якого обчислюють результат вимірювання середнього енергоспоживання МК;
3. Так само температурні та часові зміни ємності магазину конденсаторів можуть бути доволі великими, магазин конденсаторів повинен зберігати сталу ємність (похибка не більше декількох сотих процента) за час одного вимірювання (не більше 1 с);
4. Дискретність встановлення ємності магазину конденсаторів може бути доволі велика, адже допустимі зміни напруги на досліджуваному МК малі (не більше 1% від напруги його живлення), вони практично не впливають на

результат вимірювання енергоспоживання. Тому збільшення або зменшення зміни напруги на досліджуваному МК на 50% (наприклад, замість 1% до 0,5% або до 1,5%) дуже мало вплине на похибку вимірювання середнього енергоспоживання МК. В такому випадку магазин конденсаторів може змінювати свою ємність одразу вдвічі, тобто можна застосувати двійковий код при виборі дискретності магазину конденсаторів, а початкову ємність встановити рівною нижній межі ємності конденсаторів, тобто 30 нФ. Однак великий розкид ємності високочастотних конденсаторів (не менше $\pm 20\%$) вимагає більшої плавності при встановленні ємності конденсатора в колі живлення досліджуваного МК. Тому доцільно встановити наступні значення ємності двійкових розрядів магазину конденсаторів – 15 нФ; 33 нФ; 68 нФ; 150 нФ; 330 нФ; 680 нФ; 1500 нФ. При такому виборі ємностей конденсаторів розрядів магазину виникають деякі неохоплені ділянки діапазону ємностей, але вони відносно малі (менші допустимого розкиду ємності високочастотних конденсаторів) та практично не впливають на точність вимірювання середнього енергоспоживання МК.

Принципово-структурна схема пропонованого семи розрядного магазину конденсаторів подана на рис. 2.3. Через те, що паразитні ємності магазину конденсаторів не змінюють істотно його ємність (навіть у найгіршому випадку паразитні ємності не будуть перевищувати 100 пФ, що становить приблизно 0,7% від мінімальної ємності магазину конденсаторів 15 нФ, тобто приблизно в 30 разів менше за допустимий розкид ємності конденсаторів, що входять у магазин конденсаторів), а крім того паразитні ємності магазину конденсаторів практично не змінюються за час вимірювання, їх впливом на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК можна нехтувати. Тому пропонований магазин конденсаторів може мати не особливо складний екран, а для комутації конденсаторів можна використати звичайні електромагнітні реле (немає необхідності використовувати спеціальні високочастотні реле, що мають особливо малі паразитні ємності та складні екрани). Як реле пропонується використати герконові малогабаритні реле РЕС-64А. Струм їх спрацювання не

перевищує 10 мА при робочій напрузі 12 В. Тому ними можна безпосередньо керувати виходами дешифратора 155ИД10.

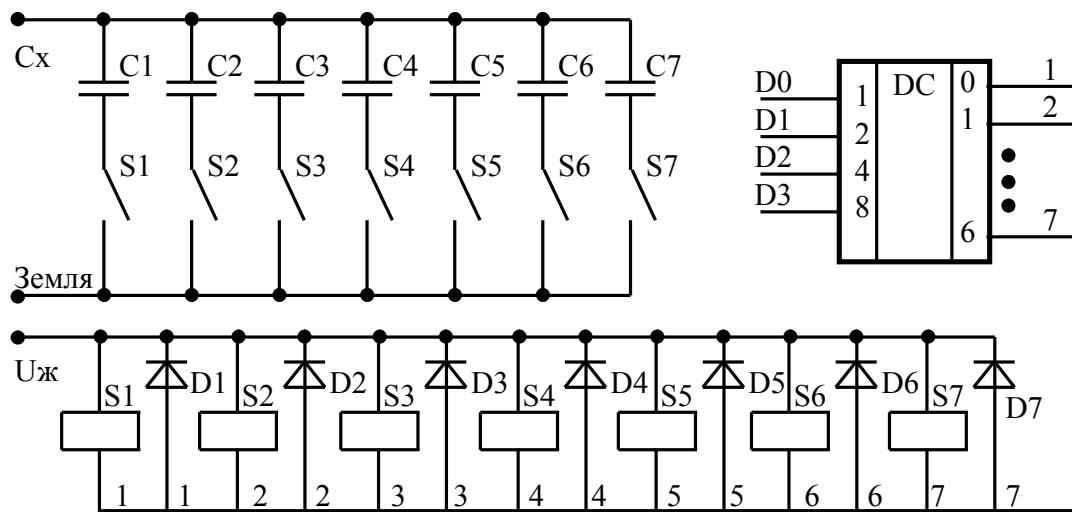


Рисунок 2.3 – Принципова семи розрядного магазину конденсаторів

Основна ідея пропонованого методу автоматичного вимірювання середнього енергоспоживання МК полягає в тому, що, якщо відповідним чином, під час попереднього налаштування схеми, вибрати ємність конденсатора в колі живлення досліджуваного МК та межі допустимої зміни напруги на досліджуваному МК як щодо збільшення напруги, так і її зменшення, то схема захисту під час дійсного вимірювання (після налаштування) не повинна спрацьовувати. Тоді енергія, відведена схемою захисту буде рівна нулю, а рівність (2.15), згідно якої розраховують спожиту МК енергію можна записати як

$$E_{REFI} = U_{REF} \cdot I_{REFI} \cdot T_{VYM}, \quad (2.17)$$

Однак, в такому випадку, крім магазину конденсаторів у колі живлення досліджуваного МК, структурна схема вимірювального каналу системи повинна включати:

1. Автоматичні програмно-керовані фіксатори всіх виходів поточної напруги живлення МК за верхню та нижню межі поточного допуску її зміни за час вимірювання. Для цього структурна схема вимірювального каналу повинна включати відповідно два компаратори та елементи фіксації спрацювань компараторів, якими повинен керувати пристрій керування системою вимірювання середнього енергоспоживання МК. Як фіксатори можна використати тригери довільного типу.
2. Також структурна схема вимірювального каналу повинна включати елементи встановлення верхньої та нижньої межі поточного допуску зміни напруги живлення МК за час вимірювання. Для цього структурна схема вимірювального каналу повинна включати відповідно два цифро-аналогові перетворювачі, якими повинен керувати пристрій керування системою вимірювання середнього енергоспоживання МК.

Узагальнена структурна схема вимірювальних каналів такої автоматизованої системи подана на рис. 2.4 [111, 112]. Вона складається з досліджуваного мікроконтролера МК, що живиться від стабілізатора струму СС. До виходу СС підключено також магазин конденсаторів Маг.С та входи компараторів КП1 і КП2, а також регулятор РСС струму стабілізатора струму СС (для забезпечення виконання умови (2.9)). Пороги спрацювання компараторів КП1 і КП2 визначають цифро-аналогові перетворювачі ЦАП1 і ЦАП2, входи опорної напруги яких підключені до виходу стабілізатора напруги СН, а входи керування – до виходів пристрою керування. До відповідних виходів пристрою керування підключені також входи керування магазину конденсаторів Маг.С (див. рис. 2.3). Крім того, у схему рис. 2.4 введено прецизійні цифрові амперметр А та вольтметр (на рис. 2.4. не показано, він вимірює вихідну напругу СН).

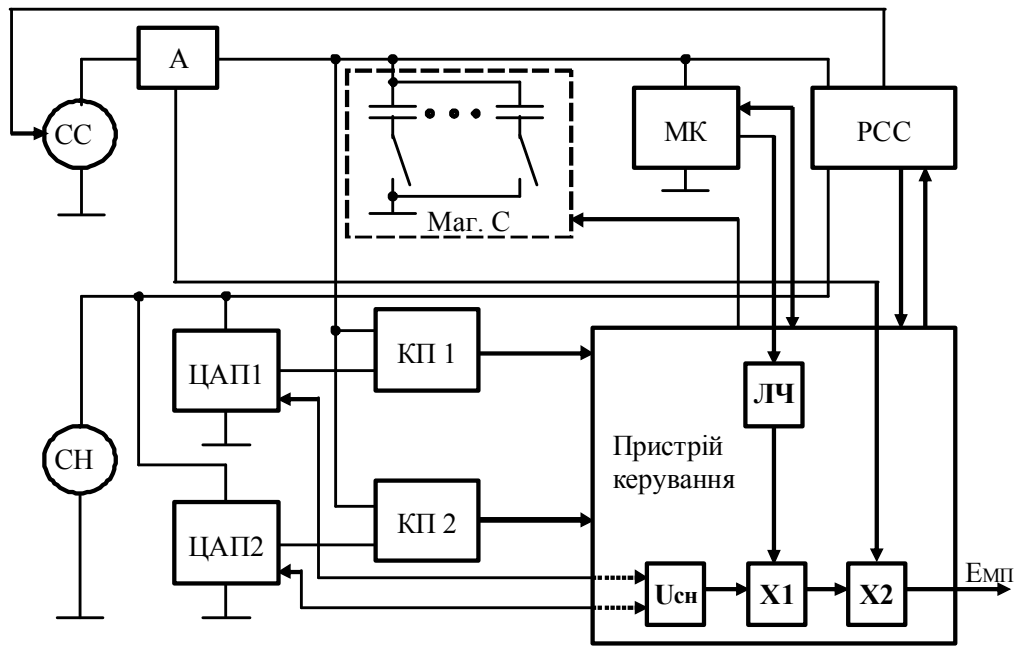


Рисунок 2.4 – Структурна схема автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

Схема рис. 2.4 працює наступним чином. Пристрій керування ініціює роботу схеми шляхом скидання досліджуваного мікроконтролера МК. При цьому також встановлюються початкові значення порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2 (шляхом записів відповідних кодів у ЦАП1 і ЦАП2), а також початкове значення ємності магазину конденсаторів Маг.С. Після виконання підпрограми налаштування внутрішніх апаратних засобів МК подає на пристрій керування сигнал початку виконання набору досліджуваних інструкцій, команд, програми або її фрагмента. Пристрій керування в свою чергу запускає вимірювальний канал регулятора РСС. Після виконання перелічених у попередньому параграфі умов закінчення вимірювання пристрій керування подає на РСС команду закінчення вимірювання (закінчення першого такту аналого-цифрового перетворення АЦП двохтактного інтегрування). РСС проводить другий такт аналого-цифрового перетворення і передає результати вимірювання інтегралу відхилення напруги живлення МК від номінальної напруги його живлення (задається напругою СН). Пристрій керування аналізує отримані дані та приймає рішення про можливу корекцію струму стабілізатора

струму СС або зміну ємності магазину конденсаторів Маг.С або значення порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2, а також аналізує виконання умови (2.9).

Після одночасного досягнення оптимальних для даного дослідження значень ємності магазину конденсаторів Маг.С, мінімальних відхилень порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2 від напруги СН та виконання умови (2.9), пристрій керування зчитує час вимірювання з лічильника ЛЧ тактових імпульсів МК, а також результати вимірювання струму СС (прецизійним цифровим амперметром А) і напруги СН (прецизійним цифровим вольтметром, не показаним на рис. 2.4), та обчислює значення енергії МК, спожитої за час вимірювання.

На рис. 2.5 подана детальна структурна схема вимірювальних каналів автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК. Ця структурна схема повністю відповідає узагальненій структурній схемі рис. 2.4, лише показує виконання окремих вузлів структури. Вона складається з досліджуваного мікроконтролера МК, що живиться від стабілізатора струму СС. До виходу СС підключено також магазин конденсаторів Маг.С та входи двох компараторів на основі операційних підсилювачів ОП1 та ОП2. Пороги спрацювання операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 визначають цифро-аналогові перетворювачі ЦАП1 і ЦАП2, входи опорної напруги яких підключені до виходів ідентичних стабілізаторів напруги СН, а входи керування – до виходів пристрою керування. Для фіксації спрацювань операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 під час вимірювання енергії споживання досліджуваного МК до виходів ОП1 та ОП2 підключено фіксатори Фікс.1 та Фікс.2 (на основі RS-тригерів), які у час, коли вимірювання не проводяться, пристрій керування утримує (як і досліджуваний МК) у скиненому стані.

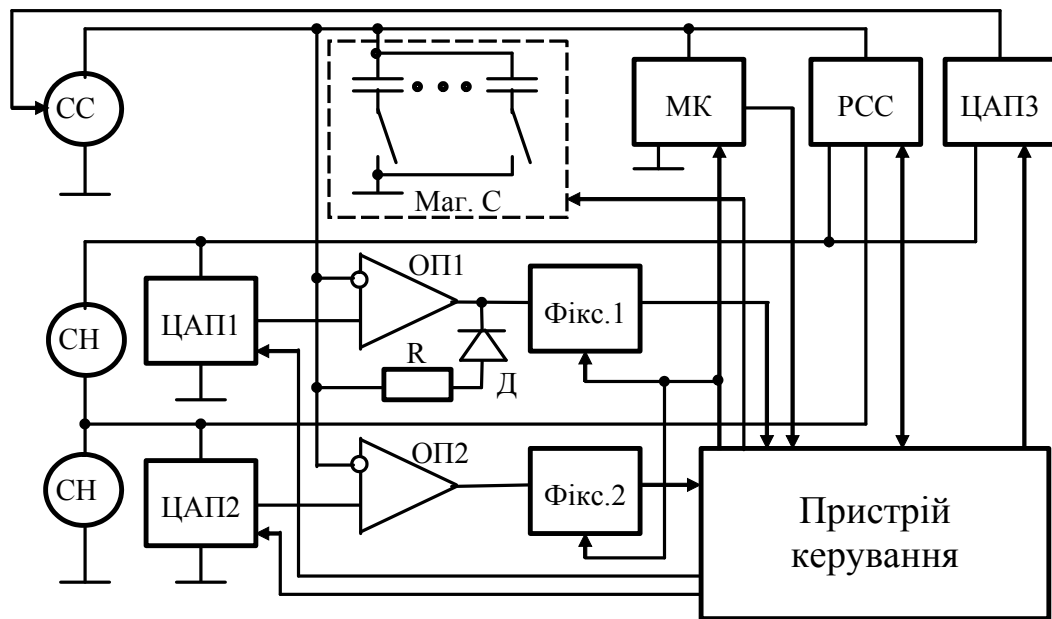


Рисунок 2.5 – Реалізація компараторів КП1 і КП2 та керування стабілізатором струму

Захист досліджуваного МК від перевищення напруги у колі живлення допустимого, заданого ЦАП1, значення (коли досліджуваний МК виконує команди, які споживають мало енергії та магазин конденсаторів Маг.С накопичує не використану досліджуваним МК енергію) виконано аналогічно до попередніх схем – за допомогою діода Д та резистора R (для обмеження відведеного з кола живлення досліджуваного МК струму), ввімкнених у зворотний зв'язок операційного підсилювача ОП1. Операційний підсилювач ОП2 фіксує зниження напруги живлення досліджуваного МК нижче заданого ЦАП2 значення. Ніякого захисту від цього не передбачено, надто низька напруга живлення не може пошкодити досліджуваний МК.

В схемі, для забезпечення виконання умови (2.9), передбачено також регулятор РСС струму стабілізатора струму СС, що керує вихідною напругою цифро-аналогового перетворювача ЦАП3 (встановлює його вхідний код). До відповідних виходів пристрою керування підключені також входи керування магазину конденсаторів Маг.С (див. рис. 2.3).

Схема рис. 2.5 працює наступним чином [111, 112]. Пристрій керування ініціює роботу схеми шляхом знімання сигналу скидання з досліджуваного мікроконтролера МК та фіксаторів Фікс.1 та Фікс.2. При цьому також встановлюються початкові значення порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2 (шляхом записів відповідних кодів у ЦАП1 і ЦАП2), а також початкове значення ємності магазину конденсаторів Маг.С. Після виконання підпрограми налаштування внутрішніх апаратних засобів МК подає на пристрій керування сигнал початку виконання набору досліджуваних інструкції, команди, програми або її фрагмента. Пристрій керування в свою чергу запускає вимірювальний канал регулятора РСС. Після виконання перелічених у попередньому параграфі умов закінчення вимірювання пристрій керування подає на РСС команду закінчення вимірювання (закінчення першого такту аналого-цифрового перетворення АЦП двотактного інтегрування). РСС проводить другий такт аналого-цифрового перетворення і передає результати вимірювання інтегралу відхилення напруги живлення МК від номінальної напруги його живлення (задається напругою СН). Пристрій керування аналізує виконання умови (2.9) та відсутність/наявність спрацювань операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 за час вимірювання. Аналіз спрацювання операційних підсилювачів ОП1 та ОП2 зводиться до зчитування виходу фіксаторів Фікс.1 та Фікс.2. Після аналізу отриманих даних пристрій керування приймає рішення про можливу корекцію струму стабілізатора струму СС або зміну ємності магазину конденсаторів Маг.С або значення порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2.

Після одночасного досягнення оптимальних для даного дослідження значень ємності магазину конденсаторів Маг.С, значень порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2 та виконання умови (2.9), а також інших умов закінчення вимірювання, вказаних у попередньому параграфі, пристрій керування зчитує час вимірювання з лічильника ЛЧ тактових імпульсів МК, а також результати вимірювання струму СС (прецизійним цифровим амперметром А) і напруги СН (прецизійним цифровим вольтметром, не

показаним на рис. 2.5), та обчислює значення енергії МК, спожитої за час вимірювання.

Як видно з опису функцій пристрою керування, алгоритм його роботи щодо керування компонентами вимірювального каналу системи доволі простий. Він зводиться до вмикання/вимикання/скидання окремих компонентів, порівняння та передачі відповідних кодів, а також подібних простих операцій. Однак основною функцією пристрою керування у схемах рис. 2.4 і 2.5 є аналіз досягнення оптимальних для даного дослідження значень ємності магазину конденсаторів $Mag.C$, значень порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2 та виконання умови (2.9), а також прийняття рішення про доцільну зміну цих значень. Алгоритм аналізу є доволі складним, через те, що він вимагає оптимізації співвідношення багатьох параметрів схеми, тому його треба розглянути окремо.

Таким чином, у даному параграфі запропоновано структурну схему вимірювального каналу автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК, де реалізовано розглянуті в § 2.1 методи забезпечення високої точності результату вимірювання (яка визначається похибками прецизійних вольтметра та амперметра постійного струму) та високу завадостійкість (за рахунок створення можливості використання завадостійких АЦП двохтактного інтегрування).

2.4 Алгоритм прийняття рішень при автоматичному вимірюванні середнього енергоспоживання мікроконтролерів

Як було вказано у попередньому параграфі, алгоритм роботи пристрою керування [112] виконує як прості функції щодо керування компонентами вимірювального каналу, так і складніші функції щодо аналізу даних, які

поступають з окремих компонентів вимірювального каналу про їх стан та результати їх роботи. Складність функцій аналізу даних визначається тим, що необхідно приймати рішення про зміну налаштувань доволі багатьох компонентів вимірювального каналу (значень ємності магазину конденсаторів Маг.С, значень порогів спрацювання компараторів КП1 і КП2, струму стабілізатора СС) для досягнення оптимального співвідношення параметрів цих компонентів під час проведення вимірювання енергоспоживання досліджуваного МК при дослідженні саме даної інструкції, команди, програми або фрагмента програми.

Для побудови відповідного алгоритму роботи пристрою керування під час аналізу та прийняття рішень необхідно визначити критерій оптимізації, зокрема, визначити, які саме параметри яких компонентів є найважливішими, а які менш важливими з точки зору отримання результату вимірювання достатньої точності. Для цього сформулюємо ієрархію правил, згідно яких пристрій керування має приймати рішення:

1. Найважливішим правилом, яке повинно бути проаналізоване першим, є виконання умови (2.9) – перевірка, чи інтеграл зміни напруги живлення досліджуваного МК за час вимірювання не перевищує допустимого значення. Якщо цей інтеграл перевищує допустиме значення, то необхідно змінити струм стабілізатора СС. Однак для вирішення питання чи струм СС повинен бути збільшений, чи зменшений, необхідно аналізувати полярність отриманого інтеграла зміни напруги живлення досліджуваного МК.
2. Наступним за важливістю є правило визначення чи спрацювали за час вимірювання компаратори КП1 і КП2 (див. рис. 2.4), тобто операційні підсилювачі ОП1 та ОП2 (див. рис. 2.5). Спрацювання КП1 (тобто ОП1) веде до спрацювання захисту від перевищення напругою живлення досліджуваного МК допустимої межі. При цьому схема захисту відводить надлишковий струм, що поступає з стабілізатора струму СС. Таким чином, через те, що у схемах рис. 2.4 і 2.5 відведений надлишковий струм

ніяк не враховується (умовою коректного вимірювання для цих схем є те, що захист не повинен спрацювати), виникає велика додаткова похибка результату вимірювання, усунення якої вимагає зменшення струму стабілізатора струму СС. Спрацювання КП2 (тобто ОП2) веде до спрацювання захисту від того, що напруга живлення досліджуваного МК опустилася нижче вибраної допустимої межі. При цьому ніякий захист не спрацює, ніякий додатковий струм не виникає. Однак для отримання високої точності вимірювання необхідно, щоби зміни напруги живлення досліджуваного МК були якнайменшими. Тому, хоча низька напруга живлення досліджуваного МК не грозить його знищенням, необхідно відповідно збільшити струм стабілізатора струму СС.

3. З точки зору виконання правил 1 і 2, доцільно взяти ємність магазину конденсаторів якнайбільшою. Однак тоді чутливість системи вимірювання середнього енергоспоживання МК буде дуже малою. Це грозить тим, що мінімально допустимі зміни напруги живлення досліджуваного МК (умова (2.6)), а також мінімально допустимий інтеграл цих змін (умова (2.9)), які зможуть розпізнати відповідні компоненти схем рис. 2.2 і 2.5, будуть відповідати енергії виконання багатьох інструкцій або команд, аналогічно, як це було показано у § 1.2. Тому ємність магазину конденсаторів Маг.С необхідно встановлювати як найменшою. При цьому виникає суперечність між виконанням пп. 2 і 3 даних правил. Зменшення ємності магазину конденсаторів веде до збільшення змін напруги на ньому, що може зумовити спрацювання компараторів КП1 і КП2 (див. рис. 2.4). Тому необхідно шукати компроміс, який забезпечить високу точність результату вимірювання при виконанні правил 1 і 2.

Слід відзначити, що перелічені правила є взаємно залежними. Дуже часто зміна налаштування одного компонента вимірювального каналу веде за собою необхідність зміни налаштування інших компонентів. Однак необхідні

співвідношення між змінами налаштування окремих компонентів ϵ , по-перше, невідомі, а по-друге, нелінійні. Крім того, слід врахувати похибки, які вносять окремі компоненти. Ці похибки доволі великі, також вони залежать від значення параметрів компонентів та їх зміни під час їх налаштування. Наприклад, похибки магазину конденсаторів (див. рис. 2.3) будуть визначатися допустимими відхиленнями ємності використаних конденсаторів від номінальних. У попередньому параграфі вказано, що на результат вимірювання похибки магазину конденсаторів не впливають – адже у формулу обчислення спожитої МК енергії ємність конденсатора не входить. Однак на процес налаштування (його сходимість та швидкість сходження) похибки магазину конденсаторів будуть впливати. Тому, крім ієрархічної структури, алгоритм аналізу та прийняття рішень повинен бути ітераційним. Інакше в даному випадку оптимум часто не може бути досягнутий.

Алгоритм підпрограми аналізу даних і прийняття рішень, який виконує сформульовані вище правила, подано на рис. 2.6. Хоча сформульоване вище перше правило важливіше, у пропонованому (рис. 2.6) алгоритмі аналізу даних і прийняття рішень аналіз починається з другого правила. Так зручніше, а домінуючий характер першого правила проявляється в тому, що перевірка його виконання проводиться чотири рази, а другого правила – всього два рази.

Таким чином, алгоритм складається з трьох уніфікованих блоків. Перший блок визначає реакцію на перевищення напругою живлення МК допустимого значення (тобто, спрацювання захисту). Відповідно до того, чи одночасно перевищує допустиме значення абсолютне значення інтегралу відхилення напруги живлення МК від заданої стабілізатором напруги СН, проводиться або зменшення струму стабілізатора струму СС або збільшення ємності магазину конденсаторів.

Другий блок визначає реакцію на те, що напруга живлення МК у деякий момент виявилася нижчою за задану межу. В цьому випадку прийняте рішення також визначається шляхом аналізу абсолютного значення інтегралу

відхилення напруги живлення МК від заданої стабілізатором напруги СН. Однак рішення приймається протилежне від першого блока.

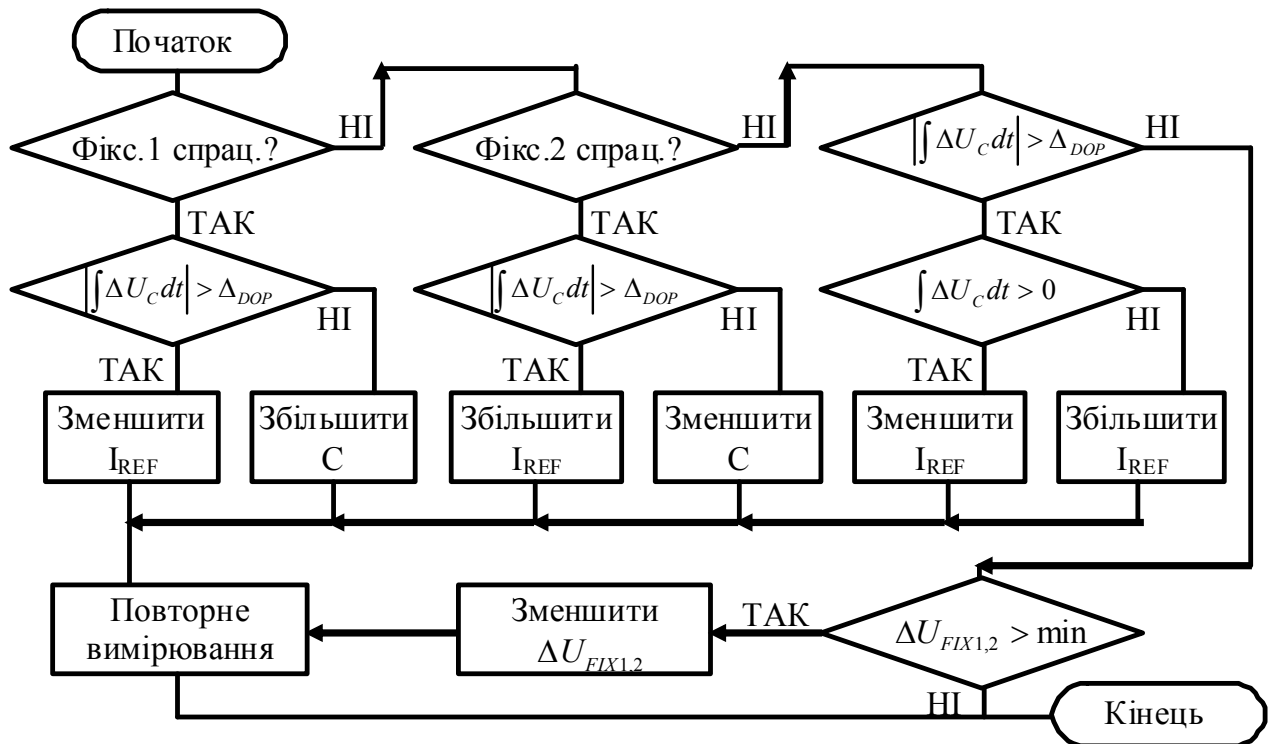


Рисунок 2.6 – Алгоритм аналізу даних і прийняття рішень

Третій блок працює тоді, коли зміни напруги живлення досліджуваного МК знаходяться у заданих межах (не викликають спрацювань компараторів КП1 і КП2). У такому випадку спочатку аналізується абсолютне значення інтегралу відхилення напруги живлення МК від заданої стабілізатором напруги СН. Якщо воно більше допустимого значення, то проводиться аналіз дійсного значення інтегралу відхилення напруги живлення МК від заданої стабілізатором напруги СН. При цьому, відповідно до полярності інтегралу, змінюється струм стабілізатора струму СС.

Якщо всі умови виконуються (зміни напруги живлення досліджуваного МК знаходяться у заданих межах і не викликають спрацювань компараторів КП1 і КП2, а значення інтегралу відхилення напруги живлення МК від заданої стабілізатором напруги СН також не перевищує допустиме значення), алгоритм

передбачає зменшення допустимих значень відхилення напруги живлення досліджуваного МК від номінальної та проводить вимірювання спочатку. Процес дослідження енергії виконання команд закінчується, коли буде досягнуто мінімальне допустиме значення відхилення напруги живлення досліджуваного МК від номінальної в процесі всього вимірювання.

Слід відзначити, що пристрій керування, згідно схеми рис. 2.5, обчислює значення спожитої МК енергії згідно (2.17). Для цього він використовує середнє значення вихідних напруг ЦАП 1 і ЦАП2. Це середнє значення повинно бути рівне вихідній напрузі стабілізатора напруги СН (при виконанні алгоритму рис. 2.6 зменшення різниці напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2 повинно проводитися симетрично до напруги СН). Але в деяких випадках, в процесі ітераційного зменшення різниці напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2, може появитися несиметричність зміни напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2. Хоча ця несиметричність не перевищує одиниці молодшого розряду, при обчисленні, згідно (2.17), спожитої МК енергії, використання середнього значення напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2 забезпечує вищу точність, ніж використання номінальної напруги живлення МК (яка рівна напрузі СН). Струм I_{REF} стабілізатора струму СС вимірюється прецизійним амперметром А після закінчення процесу вимірювання і замикання ключа (див. рис. 2.2) щоби зменшити вплив імпульсного характеру споживання МК на результат вимірювання струму. Час вимірювання T_{VYM} визначається за частотою тактового генератора МК та кількістю тактових імпульсів, що поступили на лічильник ЛЧ за час виконання заданої кількості інструкцій, команд або програми. Таким чином, всі співмножники, що входять у (2.17), відомі з високою точністю – вони можуть бути виміряні на постійному струмі за допомогою прецизійних вимірювальних приладів. Час вимірювання T_{VYM} визначається за частотою кварцового генератора, яку також можна виміряти прецизійним частотоміром.

Таким чином, у даному параграфі розроблено алгоритм аналізу даних та прийняття рішень, який дає змогу реалізувати вимірювальний канал

автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК, де реалізовано розглянуті в параграфі 2.1 методи забезпечення високої точності результату вимірювання.

Висновки до розділу 2

1. Проведено теоретичні дослідження процесу вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, показано, що, за рахунок відповідного спрощення математичних виразів, можна реалізувати нові методи вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, які будуть характеризуватися спрощеною схемою вимірювального каналу, використанням як бази схеми вимірювання миттєвого енергоспоживання мікроконтролерів, забезпечать високу точність результату вимірювання та високу завадостійкість.
2. Запропоновано структурну схему вимірювального каналу системи вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, де реалізовано методи забезпечення високої точності та завадостійкості.
3. Запропоновано також структурну схему вимірювального каналу автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, де реалізовано аналогічні п. 2 методи забезпечення високої точності та завадостійкості.
4. Розроблено алгоритм аналізу даних та прийняття рішень, який дає змогу реалізувати вимірювальний канал автоматизованої системи вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Методика дослідження методичних похибок запропонованих методів

Основною метою даної дисертаційної роботи є забезпечення високої точності та завадостійкості вимірювання середнього енергоспоживання МК. Тому необхідно оцінити похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК за допомогою запропонованих методів та вимірювальних каналів, розроблених у другому розділі. В загальному похибки, зазвичай, ділять на інструментальні та методичні [91]. Методичні похибки викликані недосконалістю самих методів вимірювання та неідеальністю засобів вимірювання, які реалізують ці методи. Вони не зникнуть навіть тоді, коли б похибки використаних засобів вимірювання були рівні нулю. Тому в загальному методичні похибки вважають більш небезпечними, ніж інструментальні [91]. Якщо інструментальні похибки можна знизити шляхом використання точніших приладів, то з методичними похибками ситуація складніша – вони, зазвичай, визначаються іншими параметрами засобів вимірювання. Тому дослідження похибок запропонованих методів з метою придатності їх до побудови відповідної ІВС слід почати саме з дослідження їх методичних похибок.

Умовно до методичних похибок можна віднести похибки, викликані дією завад на результат вимірювання – ці похибки також фактично не залежать від похибок засобів вимірювання [91]. Тому дослідження завадостійкості також проведемо у даному розділі, тим більше, що засоби дослідження методичної похибки можна буде використати для дослідження завадостійкості.

Як було вказано у попередньому розділі, запропонованим методам

притаманні методичні похибки. Причинами їх виникнення є приблизний характер рівностей (2.10) та (2.11), які, в свою чергу, визначаються не абсолютно точним виконанням умов (2.6) та (2.9). Таким чином, при вимірюванні середнього енергоспоживання МК за допомогою запропонованих у попередньому розділі методів виникають дві методичні похибки:

1. Методична похибка від інтеграла зміни напруги на МК (напруга на МК рівна напрузі на конденсаторі в колі живлення МК). Ця методична похибка викликана тим, що умова (2.9) щодо рівності нулю інтеграла відхилення поточної напруги на МК від номінальної (яку задає стабілізатор напруги СН, див. рис. 2.2 та 2.5) за час вимірювання не може бути виконана точно, а лише приблизно. Якщо МК був би лінійним споживачем електроенергії (спожитий струм лінійно залежав би від прикладеної напруги), то рівномірні відхилення напруги на МК від середнього значення (тобто у випадку, якщо би інтеграл цих відхилень поточної напруги на МК від номінальної прямував до нуля) методична похибка, викликана неточним виконанням умови (2.9) не виникала би. Однак МК, як напівпровідниковий елемент, завідомо не може бути лінійним споживачем електроенергії. Тому необхідно провести відповідні дослідження цієї методичної похибки.
2. Методична похибка від зміни напруги на МК. Ця методична похибка викликана нерівністю напруги на МК і конденсаторі в колі його живлення до і після вимірювання, тобто неточним виконанням умови (2.6). Умова (2.6) також може бути виконана лише приблизно, при цьому ніякі налаштування схеми не приведуть до того, що умови (2.6) і (2.9) будуть з високою імовірністю виконуватися одночасно. Тому за виконанням умови (2.6) повинен слідувати окремий компаратор (блок КП на рис. 2.1). Цьому компаратору притаманні інструментальні похибки, на нього діють завади (імпульсні від досліджуваного МК та інших блоків системи), крім того, для створення можливості закінчення вимірювання блок КП (див. рис. 2.1) повинен виконувати умову не точно, а з деяким допуском. Тобто блок КП повинен фіксувати входження в умову (2.6) з деяким допуском на протязі

деякого часового інтервалу. Таким чином виникає друга методична похибка, яку також треба дослідити.

Для проведення досліджень методичних похибок необхідно спочатку вибрати метод дослідження. Експериментальні дослідження дуже трудомісткі, а головне – дають змогу дослідити дуже обмежену кількість варіантів комбінацій параметрів елементів схеми. Експериментальні дослідження придатні в цьому випадку лише для верифікації інших методів дослідження. Ще менш придатні для дослідження методичних похибок аналітичні методи – більшість параметрів, потрібних для аналітичних досліджень не нормуються (фірми-виробники не надають потрібні параметри та їх допуски). Тому єдиними придатними методами є імітаційні методи досліджень.

Однак розроблення імітаційних моделей теж доволі складна та трудомістка задача, яка вимагає додаткової верифікації розроблених моделей для оцінки правильності їх побудови та адекватності до реальних елементів схеми. Тому доцільно використати комп'ютерні засоби моделювання електронних схем, наприклад, Electronic Workbench, Multisim або подібні. На сьогодні одним із кращих засобів є середовище розробки та виконання програм LabView [113], що має дуже розвинуті бібліотеки елементів і широкі можливості моделювання. Середовище LabView дає змогу значно зменшити трудомісткість моделювання, легко отримувати результати моделювання при динамічній зміні параметрів елементів, а також дозволяє досить легко перейти від імітаційного моделювання до натурального експерименту.

Однак для дослідження першої методичної похибки (від інтеграла зміни напруги на МК і на конденсаторі в колі живлення МК) необхідна модель, яка би описувала характер споживання енергії МК. Ця модель повинна описувати залежність середнього струму, який споживає МК, від напруги на ньому. Така модель повинна бути нелінійною через те, що МК є напівпровідниковим елементом. В складі середовища LabView такої моделі немає, тому її необхідно розробити. Відомі моделі [62, 114-121] або надто складні, або не годяться для реалізації засобами LabView.

Дійсний характер енергоспоживання МК різних типів визначається технологічними особливостями їх виготовлення. Всі обчислювальні пристрої (в тому числі МК) на сьогодні виготовляються за КМОН технологією. Однак ця технологія має більше десяти варіантів [3]. Дані про варіанти виготовлення конкретних МК фірми зазвичай не розголошують, а інформація про технологічні особливості виготовлення МК є, зазвичай, ноу-хау фірми. Тому розроблювана модель залежності середнього струму, який споживає МК, від напруги на ньому повинна бути універсальною та передбачати різні варіанти характеру енергоспоживання МК. В той же час висока точність цієї моделі не є обов'язково потрібною. Справа в тому, що похибки моделі енергоспоживання МК приведуть до похибки визначення методичної похибки. Тобто щодо результатів вимірювання енергоспоживання МК похибки його моделі є величинами другого порядку малості. Тому розроблювана модель енергоспоживання МК може бути доволі простою.

Нелінійне енергоспоживання МК ілюструє рис. 3.1 [110, 122]. В зв'язку з тим, що в схемах вимірювальних каналів, запропонованих у другому розділі, зміна напруги на МК ΔU_{MK} повинна бути малою, в моделі енергоспоживання МК задано нижню $U_{MIN} = U_{REF} - \Delta U_{MK}$ і верхню $U_{MAX} = U_{REF} + \Delta U_{MK}$ межі. При лінійному характері енергоспоживання МК його номінальній напрузі живлення U_{REF} відповідав би номінальний струм живлення I_{REF} . Однак дійсне енергоспоживання МК нелінійне, тому задано лише відповідність мінімального струму живлення МК I_{MIN} мінімальній напрузі живлення МК U_{MIN} та відповідність максимального струму живлення МК I_{MAX} максимальній напрузі живлення МК U_{MAX} .

Через те, що ані характер нелінійності енергоспоживання МК, ані його амплітуда (відхилення дійсного струму споживання МК I_{MK} від I_{REF} при рівності напруги живлення МК U_{REF}) невідомі (не задані виробником МК і немає результатів відповідних досліджень), у пропонованій моделі передбачено два варіанти нелінійності – типу А (коли маємо від'ємну першу похідну

функції, що описує залежність миттєвого струму, який споживає МК, від напруги на ньому) та типу В (коли маємо додатну першу похідну функції, що описує залежність миттєвого струму, який споживає МК, від напруги на ньому). Амплітуда нелінійності функції, що описує залежність миттєвого струму, який споживає МК, від напруги на ньому також невідома, тому вона задається як похибка нелінійності Δ_{nonlin} і може мати різні значення та різну полярність – плюс для нелінійності типу А і мінус для нелінійності типу В.

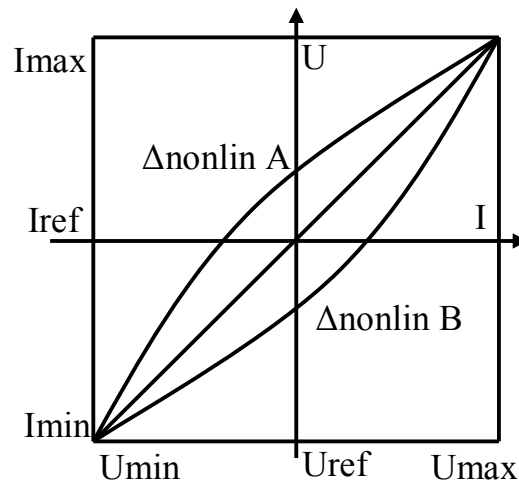


Рисунок 3.1 – Узагальнена модель співвідношення напруг і струмів, що характеризують енергоспоживання МК.

Для отримання математичних залежностей, що описують криві А і В (див. рис. 3.1) можна рішити відповідні системи трьох рівнянь, складених для точки відомих мінімальних напруги U_{MIN} та струму I_{MIN} живлення МК, для точки відомих максимальної напруги U_{MAX} та струму I_{MAX} живлення МК, а також для середньої точки, де напруга рівна номінальній U_{REF} , а струм враховує нелінійну складову $I = I_{MIN} \pm \Delta_{nonlin}$ живлення МК. Однак для побудови системи імітаційного моделювання у середовищі розробки та виконання програм LabView зручніше розчленувати модель на сталу

(початкову), лінійну та нелінійну складові. В такому випадку загальна модель нелінійного енергоспоживання МК буде мати вид:

$$I_{MK} = I_{MIN} + I_{LIN} + I_{NONLIN}, \quad (3.1)$$

Складові моделі будуть мати наступний вид:

1. Початкова складова

$$I_{MK} = I_{MIN}, \quad (3.2)$$

2. Лінійна складова

$$I_{LIN} = k \cdot \Delta U_{MK} = k \cdot (U_{MK} - U_{MIN}), \quad (3.3)$$

де $k = (I_{MAX} - I_{MIN}) / (U_{MAX} - U_{MIN})$ – коефіцієнт пропорційності.

3. Нелінійна складова

$$I_{NONLIN} = A \cdot \Delta U_{MK}^2 + B \cdot \Delta U_{MK}, \quad (3.4)$$

де A, B – коефіцієнти, отримані з розв'язку системи рівнянь

$$\begin{cases} A(U_{MAX} - U_{MIN})^2 + B(U_{MAX} - U_{MIN}) = 0 \\ A((U_{MAX} - U_{MIN})/2)^2 + B(U_{MAX} - U_{MIN})/2 = \Delta_{nonlin} \end{cases}, \quad (3.5)$$

Слід відзначити, що розроблена математична модель характеризує енергоспоживання МК як активного елемента – але реактивна складова вимагала би наявності у складі МК елемента, який би накопичував а потім віддавав накопичену енергію (аналог індуктивності або ємності). Однак для

КМОН технології створення таких елементів не характерне. Хоча при формуванні піків споживання струму дуже значною є складова струму перезаряду ємностей затвор-канал МОН транзисторів, вони не створюють з точки зору характеру енергоспоживання МК ефект вбудованої ємності. Енергія перезаряду ємностей затвор-канал МОН транзисторів не повертається у коло живлення, а втрачається (перетворюється у теплову енергію) [3]. Тому при імітаційному моделюванні можна розбити процес вимірювання на такти, незалежні один від одного. Таким чином, процес інтегрування відхилення напруги на конденсаторі в колі живлення МК можна звести до сумування напруги, що відповідає окремим тактам, параметри яких розраховують згідно моделі (3.1) ... (3.5).

Через те, що при імітаційному моделюванні час роботи МК визначається кількістю повторів розрахунку миттєвих значень параметрів енергоспоживання МК згідно моделі (3.1) ... (3.5), можна не обчислювати енергію, спожиту МК за час одного такту, а розраховувати лише миттєві значення потужності. Моделювання ведеться у режимі імітації реального часу роботи МК, який і так буде втрачений (скорочений) при обчисленні методичної похибки.

При імітаційному моделюванні значення ΔU_{MK} задається випадковим чином. Таким чином імітується різне енергоспоживання МК при виконанні різних інструкцій. Методична похибка Δ_{MET1} від не рівності нулю інтеграла зміни напруги на МК зростає з відхиленням U_{MK} від U_{REF} . Тому вибрано рівномірний закон розподілу ΔU_{MK} . При рівномірному законі розподілу всі відхилення поточного значення енергії виконання інструкцій (адже виконання всіх команд, програм та їх фрагментів у кінці зводиться до виконання набору інструкцій) мають однакову імовірність, тобто ніяке значення методичної похибки Δ_{MET1} не має переваги над іншими. Через те, що імовірність великих відхилень U_{MK} від U_{REF} при нормальному, експоненціальному та їм подібних законах розподілу менша від малих відхилень, методична похибка Δ_{MET1} для цих законів буде меншою, ніж при рівномірному законі розподілу. А при

дослідженні методичної похибки Δ_{MET1} необхідно вибрати найгірший випадок (ще гіршими були б антимодальні закони розподілу, однак вони явно не характерні для МК).

Таким чином, у даному параграфі створено математичну модель споживання струму МК залежно від напруги його живлення, необхідну для проведення імітаційного моделювання роботи запропонованих у попередньому розділі вимірювальних каналів середнього енергоспоживання МК з метою оцінки притаманним їм методичних похибок.

3.2 Оцінка методичної похибки від інтеграла зміни напруги на мікроконтролері

Як було вказано у попередньому параграфі, для оцінки придатності запропонованих у другому розділі методів вимірювання середнього енергоспоживання МК необхідно дослідити їх методичні похибки, зокрема, похибку від неточного дотримання умови (2.9), яка полягає у, що інтеграл зміни напруги на МК за час вимірювання середнього енергоспоживання МК повинен прямувати до нуля. Для дослідження цієї методичної похибки запропоновано розробити відповідний стенд у середовищі розробки та виконання програм LabView [113], для чого розроблено математичну модель споживання струму МК. Однак форма моделі у вигляді рівнянь (3.1) ... (3.5) безпосередньо для середовища LabView не придатна, її треба представити як послідовність кроків у вигляді, що відповідає представленню формул у LabView, згідно до яких проводиться моделювання.

Відповідно до вимог середовища LabView розробимо комплект рівнянь розрахунку методичної похибки [122]. Для цього спочатку введемо допоміжне значення номінального опору МК $R_{МК}$

$$R_{MK} = \frac{U_{REF}}{I_{REF}}, \quad (3.6)$$

Далі розрахуємо випадкове значення поточної зміни напруги МК в допустимій зоні його зміни

$$u_2 = 2\Delta_U \cdot rand, \quad (3.7)$$

де u_2 – поточне лінійне відхилення дійсної напруги живлення МК від значення мінімальної напруги живлення МК U_{MIN} ;

Δ_U – допустиме відхилення дійсної напруги живлення МК від значення номінальної напруги живлення МК U_{REF} . Коефіцієнт 2 враховує, що $\Delta_U = U_{REF} - U_{MIN} = U_{MAX} - U_{REF}$, тобто, що максимальна зміна дійсної напруги живлення МК від прийнятого за основу значення U_{MIN} рівна $2\Delta_U$;

$rand$ – випадкова змінна з рівномірним законом розподілу, $rand = \overline{0...1}$.

В наступному кроці розрахуємо поточне нелінійне відхилення дійсної миттєвої напруги живлення МК u_3 від значення мінімальної напруги живлення МК U_{MIN}

$$u_3 = -A \cdot (u_2^2) + B \cdot u_2, \quad (3.8)$$

де A , B – коефіцієнти, отримані з розв'язку системи рівнянь (3.5).

Після того розрахуємо поточне миттєве значення u_1 дійсної напруги живлення МК на даному кроці

$$u_1 = U_{REF} - \Delta_U + u_2 + u_3, \quad (3.9)$$

Далі розрахуємо миттєве значення поточного струму i_{MK} , який споживає МК

$$i_{MK} = \frac{u_1}{I_{REF}}, \quad (3.10)$$

Знаючи миттєві значення напруги на МК u_1 та спожитого ним струму i_{MK} розрахуємо потужність p_{MK} , споживану МК на поточному кроці моделювання (вона еквівалентна енергії споживання МК за одиницю часу, у нашому випадку – за один крок моделювання)

$$p_{MK} = u_1 \cdot i_{MK}, \quad (3.11)$$

а також номінальну потужність P_{MK} споживання МК

$$P_{MK} = U_{REF} \cdot I_{REF}, \quad (3.12)$$

Поточне значення абсолютної методичної похибки Δ_{MET1} визначимо за формулою

$$\Delta_{MET1} = p_{MK} - P_{MK}, \quad (3.13)$$

а відносне значення поточної методичної похибки δ_{MET1} – за формулою

$$\delta_{MET1} = \frac{\Delta_{MET1} \cdot 100\%}{P_{MK}}, \quad (3.14)$$

Сумарне значення методичної похибки δ_{MET1}^{Σ} за час вимірювання T оцінимо за формулою

$$\delta_{MET1}^{\Sigma} = \sum_{i=0}^N \delta_{MET1i} , \quad (3.15)$$

де N – вибрана кількість кроків моделювання, у нашому випадку рахуємо, що один крок моделювання виконується за одиницю часу, тоді $N \equiv T$.

На рис. 3.2 представлена схема стенду обчислення сумарної методичної похибки δ_{MET1}^{Σ} [122], викликаної нелінійністю споживання струму досліджуваного МК при виконанні умови (2.9). На схемі рис. 3.2 зліва представлені формули (3.6) ... (3.15) розрахунку методичної похибки, реалізовані в середовищі LabVIEW [113]. Перша формула дозволяє визначити номінальний опір МК R_{MK} . Вона реалізована блоками завдання I_{nom} і U_{nom} і блоком ділення R_{mk} . Результат обчислення цієї і наступних формул, для подальшого аналізу, записується в масив (формуваць масиву на рис. 3.2 позначений штриховий лінією).

Друга формула обчислює поточне лінійне відхилення дійсної напруги живлення МК від значення мінімальної напруги живлення u_2 , вона реалізована блоками завдання дельта, помножувачем $2 * \text{дельта}$, генератором випадкових чисел Random і помножувачем $U2$.

Третя формула обчислює лінійну і нелінійну частини нелінійної складової напруги u_3 на МК. Вона реалізується блоками a , b встановлення коефіцієнтів A , B , визначених згідно (3.5), блоками множення Multiply1 , Multiply2 і блоком зведення в квадрат Power of X . Поточне значення напруги на МК отримується з четвертої формули. Вона реалізована блоком віднімання $U_{nom}-\text{delta}$ і суматорами $u2$, $u3$. Поточне значення струму споживання МК визначається з п'ятої формули. Вона реалізована блоком ділення i .

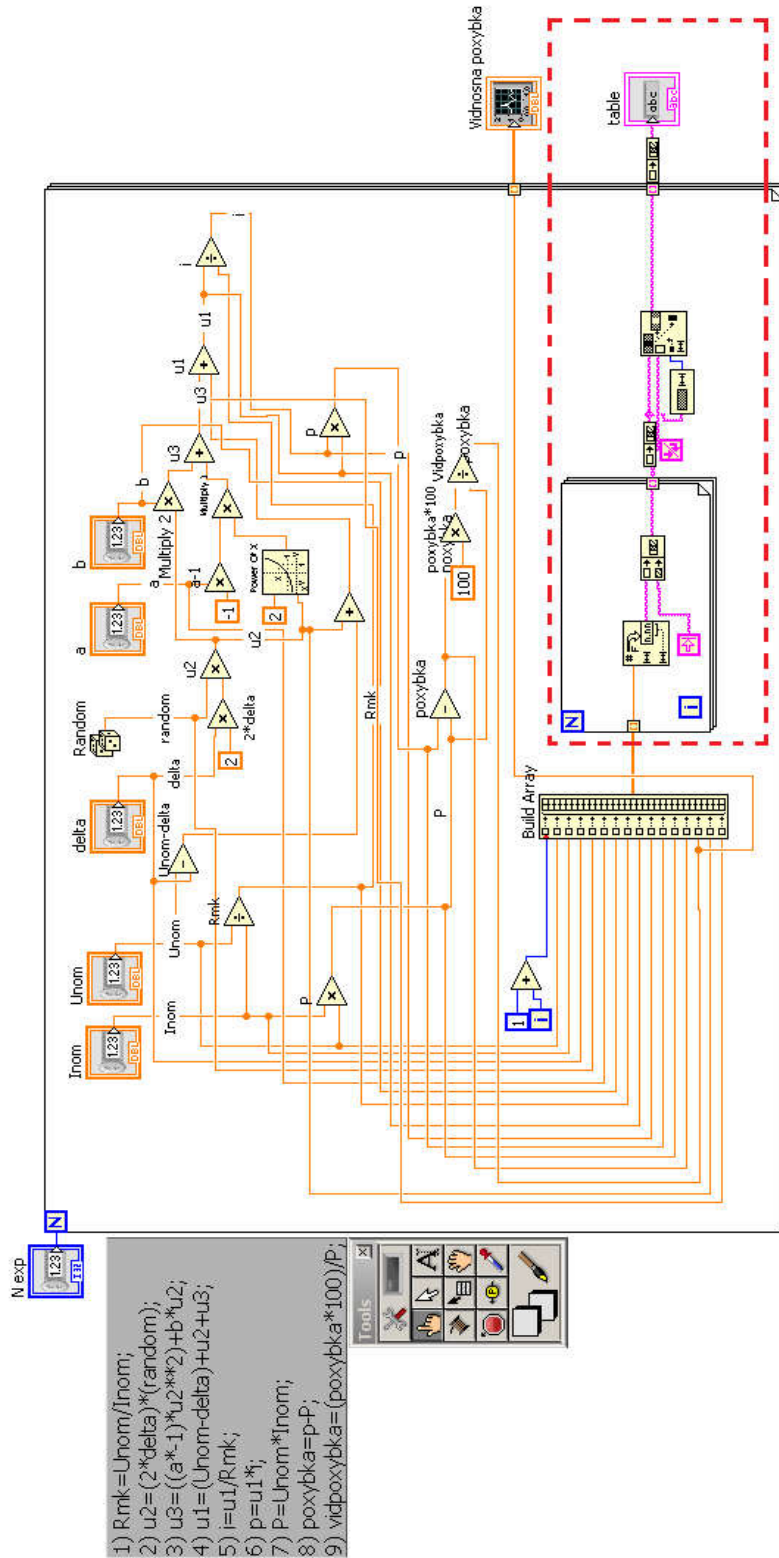


Рисунок 3.2 – Схема стенду обчислення сумарної методичної похибки δ_{MET1}^{Σ} , викликаної нелінійністю споживання струму досліджуваного МК при виконанні умови (2.9)

Шоста формула визначає поточну потужність МК (як було вже сказано поточна потужність є еквівалентом енергії, споживаної МК при даному поєднанні параметрів за час виконання однієї інструкції). Вона реалізована блоком множення p .

Сьома формула обчислює номінальну потужність споживання МК і реалізована блоком множення P . Обчислення значення служить для визначення абсолютного (восьма формула) і відносного (дев'ята формула) відхилення споживаної енергії від номінального значення за час виконання однієї інструкції.

Як уже вказувалося, результати обчислення по всіх формулах записується в масив для подальшого аналізу. Крім того, результат обчислення відхилення споживаної МК енергії, яка обраховується в дев'ятій формулі записується в окремий масив для спрощення побудови графіків. Подальшу обробку даних можна проводити за допомогою засобів середовища розробки та виконання програм LabVIEW.

Розроблений віртуальний стенд дослідження методичних похибок системи вимірювання середнього енергоспоживання МК [122], що реалізує метод [105-109], дозволяє досліджувати методичну похибку через нелінійність МК, викликану неточним дотриманням умови (2.9).

Як вже було сказано, через відсутність даних про нелінійність МК різних типів, доведеться досліджувати відхилення споживаної енергії від номінального значення не тільки для нелінійності типу А і В (див. рис. 3.1), але і для різних значень максимальної нелінійності (передбачається досліджувати відхилення споживаної енергії для змін максимальної нелінійності Δ_{MAX} в межах від 10 до 40% від відхилення напруги $\Delta U_{МК}$ на досліджуваному МК) і для різних значень допустимого відхилення напруги $\Delta U_{МК}$ на досліджуваному МК (передбачається досліджувати допустимі відхилення в межах від ± 10 до ± 50 мВ, тобто при змінах напруги на МК 20 мВ, 40 мВ, 60 мВ, 80 мВ, 100 мВ).

Однак у першу чергу слід дослідити вплив кількості повторів досліджуваних інструкцій на похибку вимірюного значення середнього енергоспоживання МК відносно номінального значення [123].

На рис. 3.3 подано залежності сумарної відносної методичної похибки δ_{MET1}^{Σ} від кількості циклів n виконання інструкції (або кількості рядків програми, написаної на асемблері) та амплітуди нелінійності Δ_{nonlin} енергоспоживання МК (Δ_{nonlin} у % вказана справа від графіків) [122, 123]. Як видно з рис. 3.3, δ_{MET1}^{Σ} суттєво падає з ростом n . Це пояснюється тим, що при початковому налаштуванні системи (див. рис. 2.1) струм споживання встановлюється таким чином, що сумарне відхилення напруги на МК за задану кількість циклів n наближається до нуля. Тоді значення δ_{MET1}^{Σ} будуть мати як додатні, так і від'ємні значення та взаємно компенсуватися.

Рисунок 3.3 – Залежності сумарної середньої відносної методичної похибки від кількості циклів n виконання інструкції

На рис. 3.4 подано залежності сумарної відносної методичної похибки δ_{MET1}^{Σ} для $n = 500$ та нелінійності типу А від амплітуди нелінійності Δ_{nonlin} енергоспоживання МК в межах від 10% до 40% та максимальної зміни напруги на МК від ± 10 до ± 50 мВ (тобто від 20 мВ до 100 мВ) [122, 123]. Значення максимальної зміни напруги на МК вказані внизу графіка. Як видно з рис. 3.4,

навіть в найгіршому випадку (амплітуді нелінійності Δ_{nonlin} струму споживання 40% та зміни напруги ± 50 мВ) методична похибка δ_{MET1}^{Σ} не перевищує 0,018%. При зменшенні нелінійності та змін напруги на МК δ_{MET1}^{Σ} зменшується.

Рисунок 3.4 – Залежності сумарної середньої відносної методичної похибки від нелінійності енергоспоживання типу А та максимальної зміни напруги

Для нелінійності типу В і тих самих умов дослідження як і для нелінійності типу А сумарна відносна методична похибка δ_{MET1}^{Σ} , як видно з рис. 3.5, суттєво менша. В цьому випадку взаємна компенсація похибок діє успішніше.

Як видно з графіків рис. 3.3 ... 3.5, дослідження методичної похибки δ_{MET1}^{Σ} пропонувані методів вимірювання середнього енергоспоживання МК (які викликані заміною інтегралу добутку миттєвих значень напруги і струму на добуток номінальних величин напруги і струму живлення МК), показали, що вона стає досить малою при багатократному виконанні інструкції або програми. Для вирішення питання про можливість побудови на базі пропонованого методу прецизійної системи вимірювання енергоспоживання МК необхідно дослідити аналогічним чином іншу методичну похибку, що виникає через нерівність напруги на конденсаторі в колі живлення МК до і після дослідження (неможливість точного виконання умови $\Delta E_C \rightarrow 0$).

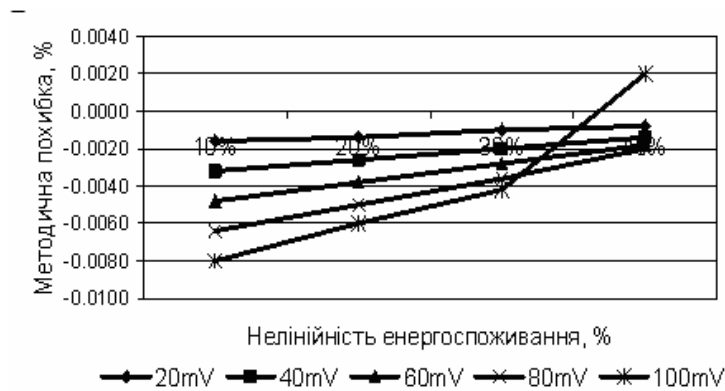


Рисунок 3.5 – Залежності сумарної середньої відносної методичної похибки від нелінійності енергоспоживання типу В та максимальної зміни напруги

Таким чином, у даному параграфі створено математичну модель споживання струму МК, придатну для реалізації у середовищі розробки та виконання програм LabView. На основі цієї моделі розроблено стенд дослідження методичної похибки від неточного дотримання умови (2.9), яка полягає у, що інтеграл зміни напруги на МК за час вимірювання середнього енергоспоживання МК повинен прямувати до нуля. Результати дослідження показали, що у найгірших умовах ця методична похибка не перевищує 0,02%, тому нею можна нехтувати.

3.3. Оцінка методичної похибки від зміни напруги на мікроконтролері

Як було показано у § 3.1 та [123, 124], крім методичної похибки від інтеграла зміни напруги на МК за час вимірювання, дослідженої у § 3.2, запропонованим у другому розділі методам вимірювання середнього енергоспоживання МК притаманна ще одна методична похибка – від зміни напруги на МК. Ця методична похибка викликана не точним виконанням умови (2.6). Якщо умова (2.6) виконується не точно, тобто напруга на конденсаторі в колі живлення МК за час вимірювання його середнього енергоспоживання

змінюється, то виникає різниця між енергією, що поступила з джерела живлення (стабілізатор струму СС, див. рис. 2.1), та енергією, в дійсності спожитою МК. Якщо МК спожив менше енергії, ніж поступило з джерела живлення, то надлишок енергії "сховав" конденсатор в колі живлення (напруга на ньому зростає). Якщо МК спожив більше енергії, ніж поступило з джерела живлення, то недостачу енергії "поповнив" конденсатор в колі живлення (напруга на ньому впала). Однак в обох випадках обмін енергією між МК та конденсатором не враховують рівняння (2.15) і (2.16), тобто цей обмін веде до появи похибки вимірювання.

У запропонованих в другому розділі схемах вимірювальних каналів передбачено активний метод зменшення першої методичної похибки – таке налаштування струму стабілізатора струму, щоби інтеграл зміни напруги на МК за час вимірювання прямував до нуля, тобто виконувалася умова (2.9). Умова (2.9) при реалізації методів, запропонованих у другому розділі, може бути виконана лише наближено. Крім того, виконання умови (2.9) цілком не означає, що автоматично буде виконана умова (2.6), тобто що зміна напруги теж прямує до нуля, а в такому випадку і зміна енергії ΔE_C , накопиченої конденсатором С, буде прямувати до нуля $\Delta E_C \rightarrow 0$.

Але для другої методичної похибки передбачений лише пасивний метод зменшення. Цей метод полягає у очікуванні моменту, коли зміна напруги у колі живлення МК наблизиться до нуля. Через те, що у § 2.1 перелічено шість умов закінчення вимірювання, стає зрозуміло, що вимога їх точного виконання буде означати малу імовірність одночасного виконання всіх цих умов, тобто успішного завершення вимірювання середнього енергоспоживання МК. Зате буде зростати можливість не успішного завершення вимірювання – в результаті перевищення допустимого часу вимірювання T_{MAX} , що автоматично вимагає нового запуску процедури вимірювання (результат вимірювання не був досягнутий). Таким чином, при жорстких вимогах до виконання всіх шести умов закінчення вимірювання, можливе "заціклення" процесу вимірювання – він ніколи не закінчиться (або закінчиться за дуже тривалий час). Тому

необхідно дослідити похибки, що виникають від послаблення вимог до умов закінчення вимірювання, для того, щоби знайти розумний компроміс між допустимою похибкою результату вимірювання та імовірністю закінчення процесу вимірювання.

Зміну енергії конденсатора в колі живлення МК ΔE_C можна визначити як [80]

$$\Delta E_C = (C \cdot \Delta U_C^2) / 2, \quad (3.16)$$

де ΔU_C – зміна напруги на конденсаторі C в колі живлення МК (див. рис. 2.2 і 2.5).

Залежність (3.16) дає змогу оцінити відносну методичну похибку δ_{MET2} від того, що $\Delta U_C \neq 0$

$$\delta_{MET2} = (C \cdot \Delta U_C^2) / (2E_{INST}), \quad (3.17)$$

де E_{INST} – енергія, необхідна для виконання однієї інструкції.

Як приклад візьмемо інструкції для МК типу ARM7TDMI [14, 59, 63, 67, 89]. Середня енергія, необхідна для виконання однієї інструкції E_{INST} складає приблизно 2 нДж. На рис. 3.6 подано залежність відносної методичної похибки δ_{UC} від зміни ΔU_C на конденсаторі C в колі живлення МК (див. рис. 2.2 і 2.5) від 2 до 32 мВ (тобто від 0,04 до 0,64% від напруги живлення 5В) при ємностях конденсатора C від 0,03 до 3 мкФ [122, 123]. Як видно із рис. 3.6, відносна методична похибка δ_{MET2} може змінюватися в дуже широких межах.

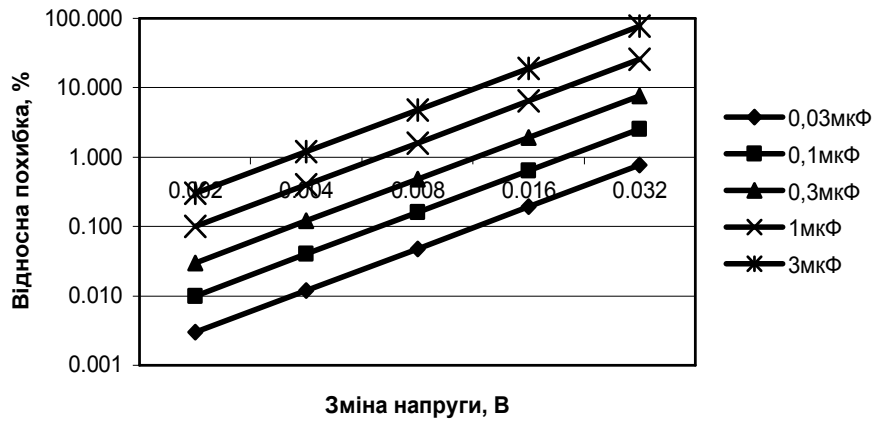


Рисунок 3.6 – Залежність відносної методичної похибки δ_{MET2} вимірювання енергії виконання інструкції від зміни напруги ΔU_C на конденсаторі в колі живлення МК

Середній струм I_{MK} живлення МК в цьому випадку можна обчислити за формулою [80]

$$I_{MK} = (C \cdot \Delta U_C) / (k \cdot t) , \quad (3.18)$$

де t – період імпульсів тактового генератора досліджуваного МК;
 k – шпаруватість імпульсів енергоспоживання МК (як видно із рис. 1.1, основний струм споживання МК має характер коротких імпульсів, синхронних із фронтами імпульсів тактового генератора).

Першим очевидним шляхом зменшення методичної похибки δ_{MET2} від зміни напруги на конденсаторі в колі живлення МК є завершення процесу вимірювання в той момент, коли ця зміна рівна нулю, тобто умова (2.6) строго виконується, і $\Delta U_C = 0$.

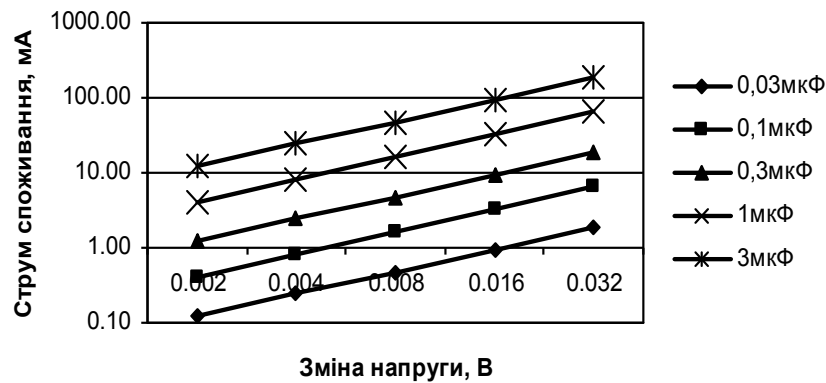


Рисунок 3.7 – Залежність середнього струму живлення МК від зміни напруги ΔU_C на конденсаторі в колі живлення МК

Однак імовірність одночасного виконання умов (2.6) і (2.9), а також умови кратності інтервалу T процесу вимірювання періоду мережі доволі низька за прийнятний час вимірювання. Крім того, в умовах дії завад строге виконання умови (2.6) теж мало імовірне – на пристрій фіксації умови $\Delta U_C = 0$ діють завади, тому реально умова ця може бути виконана лише з деякою похибкою.

Тому необхідно враховувати приблизність виконання всіх вказаних у §2.1 вимог з деякими похибками та дослідити методичні похибки від похибок виконання цих умов. При цьому похибки від приблизного виконання умови (2.9) було досліджено у попередньому параграфі, а похибки від приблизного виконання умови кратності інтервалу T процесу вимірювання до періоду мережі буде досліджена у наступному параграфі. В даному параграфі буде досліджена похибка від приблизного виконання умови (2.6), тобто $\Delta U_C = 0$.

Для зменшення методичної похибки від зміни напруги на конденсаторі в колі живлення МК пропонується два шляхи. Першим шляхом є створення компаратора, який буде постійно слідкувати за виконанням умови (2.6), точніше умови

$$\Delta U_C \leq \Delta U_C^{DOP}, \quad (3.19)$$

де ΔU_C^{DOP} – допустима зміна напруги на конденсаторі С в колі живлення МК за час вимірювання T .

Компаратор, що відслідковує зміну напруги на конденсаторі С в колі живлення МК, повинен забезпечити:

1. фіксування перевищення допустимої зміни напруги на конденсаторі ΔU_C^{DOP} в обох напрямках (як розряду, так і заряду конденсатора С);
2. можливість встановлення заданого рівня фіксування незалежно за обома напрямками;
3. відносно високу швидкодію;
4. як найвищу завадостійкість (можливість надійної фіксації не перевищення допуску ΔU_C^{DOP} при дії завад у колі живлення які створює сам МК).

Останні дві вимоги є суперечливими, тому використання фільтрів з достатньо великими постійними часу не допускається.

Структурно-принципова схема компаратора, що виконує перелічені вимоги, подана на рис. 3.8. В її склад входять компаратори КР1 і КР2, вузол встановлення напруг спрацювання компараторів R2 ... R5, фільтр R1C1, а також тракт синхронізації (формувачі коротких імпульсів F і схема затримки Затр.) і схема співпадання І-НІ.

Напруги спрацювання компараторів встановлюють вище напруги опорного джерела U_N за допомогою R4 на ΔU_C^{DOP} (для КР1) і нижче U_N за допомогою R5 на ΔU_C^{DOP} (для КР2). Відповідно на виходах КР1 і КР2 логічна одиниця появляється лише тоді, коли відхилення напруги $U_{МК}$ на МК не перевищує ΔU_C^{DOP} від U_N .

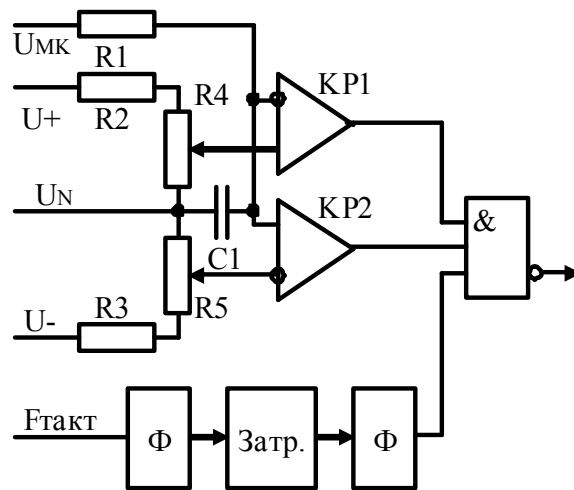


Рисунок 3.8 – Структурно-принципова схема компаратора

Для того, щоби імпульсні завади, створені характером споживання досліджуваного МК (див. рис. 1.1), менше впливали на прийняття рішення про можливість закінчення циклу вимірювання середнього енергоспоживання, в схему введені фільтр $R1C1$ та тракт синхронізації. Останній затримує момент спрацювання схеми І-НІ на дещо більше, ніж половину періоду тактових імпульсів генератора досліджуваного МК. Це, особливо при дослідженні енергоспоживання МК на понижених частотах, дає змогу змістити момент прийняття рішення в частину періоду, коли наведені імпульсні завади мінімальні. Дослідження макета показали, що, при розміщенні компараторів KP1 і KP2, а також фільтра $R1C1$, безпосередньо біля досліджуваного МК, можна впевнено фіксувати не перевищення допуску $\Delta U_C^{DOP} \leq 5mV$.

Знаючи значення ємності конденсатора C в колі живлення МК та максимально допустиму зміну напруги на МК можна, за рис. 3.7, оцінити середній струм споживання МК. Далі, за цими значеннями, за рис. 3.6, можна оцінити значення методичної похибки, яка виникає при вимірюванні середнього енергоспоживання МК пропонованим методом через те, що умова $\Delta U_C \rightarrow 0$ не виконується точно.

Слід відзначити, що формула (3.17) визначає відносну похибку вимірювання середнього енергоспоживання МК при виконанні однієї інструкції. Тому другим методом зменшення другої методичної похибки δ_{MET2}

є вимірювання середнього енергоспоживання МК при виконанні багатьох інструкцій. В такому випадку формула (3.17) прийме вид

$$\delta_{MET2}^n = (C \cdot \Delta U_C^2) / (2nE_{INST}), \quad (3.20)$$

де n – кількість повторів інструкції при вимірюванні середнього енергоспоживання МК (або сумарна кількість інструкцій при багатократному виконанні команд, програм або їх фрагментів);

δ_{MET2}^n – друга методична похибка при багатократному виконанні інструкцій.

Однак такий шлях, хоча і коректний, доволі громіздкий і його важко використати перед проведенням вимірювань. Тому пропонується інший шлях попередньої оцінки цієї методичної похибки [123]. Для цього обчислимо зміну напруги на конденсаторі C як [80]

$$\Delta U_C = \frac{I_C \cdot t}{C} = \frac{I_C}{C \cdot f}, \quad (3.21)$$

де f – тактова частота МК (нехай МК має RISC архітектуру і виконує команду за один такт).

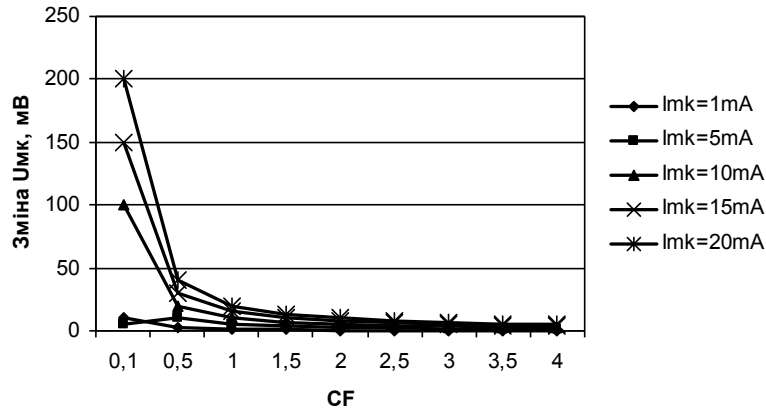
Через те, що δ_{MET2} є похибкою, нелінійністю розряду конденсатора C нехтуємо (похибка від нелінійності заряду/розряду конденсатора C буде похибкою другого порядку малості).

Тоді можна визначити залежності ΔU_C від добутку $C \cdot f$, які подані на рис. 3.9. Як видно з рис. 3.9, збільшення частоти f та/або ємності конденсатора C веде до зменшення ΔU_C , тобто зменшення δ_{MET2} . Однак при цьому знижується чутливість вимірювальної системи, тому необхідний відповідний компроміс.

Зміну енергії ΔE_C конденсатора C , викликану ΔU_C , з врахуванням

(3.21), можна обчислити як [80]

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} C \cdot \Delta U_C^2 = \frac{1}{2} C \left(\frac{I_C}{C \cdot f} \right)^2 = \frac{I_{MK}^2}{2 \cdot C \cdot f^2}, \quad (3.22)$$



Рисунки 3.9 – Залежність зміни напруги на МК від струму споживання та добутку ємності конденсатора в колі живлення на тактову частоту

$$\delta_{MET2} = \Delta E_C \cdot 100\% / E_{INST}, \quad (3.23)$$

Енергія E_{INST} залежить від типу МК та виконуваної команди, приймемо, як і раніше, $E_{INST} = 2$ нДж (середня енергія виконання інструкції для МК ARM7TDMI). При оцінці другої методичної похибки другим методом також слід врахувати, що при багатократному виконанні інструкцій похибка пропорційно зменшується. Залежність δ_{MET2} від I_{MK} та добутку $C \cdot f$, з врахуванням того, що інструкція повторюється 500 разів, подана на рис. 3.10.

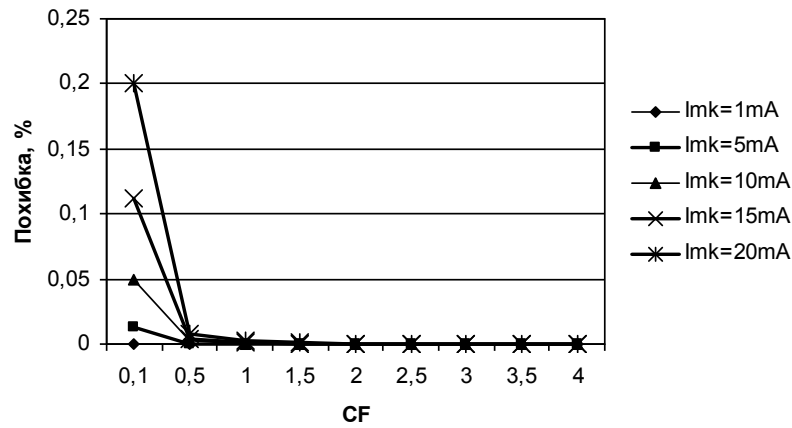


Рис 3.10 – Залежність методичної похибки пропонованого методу від струму споживання МК та добутку ємності конденсатора в колі живлення на тактову частоту

Таким чином, дослідження другої методичної похибки запропонованих у другому розділі методів вимірювання середнього енергоспоживання МК, викликані нерівністю напруги на конденсаторі в колі живлення МК до і після вимірювання (неможливість точного виконання умови $\Delta U_C \rightarrow 0$), показали, що вона може бути досить малою при відповідному виборі тактової частоти МК, при якій вимірюється середнє енергоспоживання МК, ємності в колі живлення та багатократному виконанні інструкції, команди або програми. Ця похибка має помітне значення (декілька десятих відсотка) лише при вимірюванні енергоспоживання однієї або декількох інструкцій або при малій ємності конденсатора та низькій тактовій частоті для МК із значним енергоспоживанням. В інших умовах ця похибка різко зменшується. Застосування пропонованого компаратора дає змогу встановити обмеження на зміну напруги на конденсаторі за час вимірювання, тобто дозволити завершити процес вимірювання тоді, коли вказана зміна напруги не перевищує допустиму.

3.4. Оцінка завадостійкості вимірювального каналу

Наступним обмеженням точності запропонованих у другому розділі методів вимірювання середнього енергоспоживання МК є вплив завад на результат вимірювання, тому необхідно також дослідити завадостійкість цього методу. Як вже було вказано, забезпечити значно вищу завадостійкість результату вимірювання можна за рахунок заміни цифрового осцилографа інтегруючим АЦП, наприклад, двохтактного інтегрування (АЦП ДІ) [91]. При цьому тривалість процесу вимірювання повинна бути кратною періоду мережі живлення і враховувати його зміни (див. правила закінчення процесу вимірювання, сформульовані у § 2.1).

Але, якщо виконувати п.1 з максимальною точністю (це забезпечує максимальну завадостійкість методів [105-109, 111, 112]), то імовірність одночасного виконання всіх шести правил закінчення вимірювань дуже мала. В цьому випадку постає необхідність багатократного виконання процесу вимірювання (до одночасного виконання всіх шести правил). Однак це все одно не дає гарантій одночасного виконання всіх вимог.

В зв'язку із вище сказаним необхідно змінити формулювання цього правила на наступне: "Закінчення процесу вимірювання можливе лише після виконання умови, що відхилення тривалості процесу вимірювання від тривалості кратної поточному періоду мережі живлення не перевищує деякого заданого максимального значення". Однак в такому випадку завадостійкість ІВС середнього енергоспоживання МК знижується. Тому необхідно провести достатньо повний аналіз завадостійкості методів [105-109, 111, 112]. При цьому слід визначити залежності максимальної похибки результату вимірювання від параметрів процесу вимірювання. Це необхідно для того, щоби при розробленні ІВС середнього енергоспоживання МК можна було досягнути відповідного компромісу. Він повинен забезпечити достатньо високу імовірність виконання всіх шести перелічених у §2.1 правил за рахунок їх виконання не з

максимальною точністю, а з відповідними допусками.

Під завадостійкістю пропонованого методу будемо розуміти відношення додаткової похибки результату вимірювання середнього енергоспоживання МК, викликаній дією завади, до амплітуди цієї завади [91]. Основним джерелом завад в схемі пристроїв вимірювання як миттєвого, так і середнього енергоспоживання є мережа живлення 50 Гц. Ця завада носить адитивний характер – на вимірюваний сигнал накладається напруга завади, викликана електромагнітними полями розсіювання, зокрема, трансформатора блоку живлення вимірювальних каналів системи. Під час імітаційного моделювання роботи пристрою, що реалізує запропоновані методи, спочатку обчислювалися поточні результати вимірювання енергії e_{MCi} , які потім сумувалися (інтегрувалися) для обчислення середньої енергії E_{MC}

$$E_{MC} = \sum_{i=0}^n e_{MCi}, \quad (3.24)$$

На поточні результати e_{MCi} накладалися миттєві значення завади e_{Zi} , обчислені за формулою

$$e_{Zi} = E_Z \sin \frac{2\pi i}{180}, \quad (3.25)$$

де E_Z – амплітуда завади;

180 – кількість квантів, на які поділено один період синусоїди;

i – номер поточного кванта.

Через те, що запуск системи вимірювання середнього енергоспоживання МК буде завжди виконуватися в момент переходу напруги мережі через нуль, у (3.25) фазовий кут враховувати немає потреби.

Дослідження проведено шляхом імітаційного моделювання у середовищі розробки та виконання програм LabView [113]. Для визначення максимальної похибки від впливу завад було реалізовано модель, що імітує процес вимірювання середньої енергії згідно методу [105]. Максимальна тривалість процесу вимірювання встановлена 1800 квантів. Процес вимірювання імітувався дискретним сумуванням результатів обчислення напруги на МК. Максимальне значення похибки обчислювалося як поточна різниця між значеннями суми (інтегралу) напруги на МК при дії завади заданої амплітуди та суми (інтегралу) напруги на МК при відсутності дії завади. Отримані поточні значення похибки, викликані дією завади, записувалися в таблицю.

При цьому в процесі імітаційних досліджень задавалися значення амплітуди завади E_Z від 2 до 64 мВ [125]. Значення допустимого відхилення тривалості процесу вимірювання використано як аргумент функції максимальної похибки, викликані дією завади. Максимальне значення допустимого відхилення тривалості задано із великим запасом. Воно відповідає ± 10 квантам, тобто $\pm 5,6\%$ від періоду завади, або приблизно 1,1 мс.

На рис. 3.11 подано залежність максимальної відносної похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК від відхилення тривалості процесу вимірювання від номінальної тривалості періоду мережі 180 квантів (процес вимірювання близький до одного періоду мережі 50 Гц) при дії завади зазначеної в легенді амплітуди. Як видно з рис. 3.11, при амплітудах завади, що реально зустрічаються в колі вимірювання (згідно [91] – не більше 10 ... 15 мВ), максимальна похибка вимірювання середнього енергоспоживання МК не перевищує 0,002% навіть при досить великих відхиленнях тривалості процесу вимірювання від періоду мережі [125]. Такою похибкою можна нехтувати.

Якогось помітного впливу на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК набуває завада лише великої амплітуди – 64 мВ. Однак і у цьому випадку вплив завади великої амплітуди на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК можна помітно зменшити за рахунок продовження часу вимірювання до кількох періодів завади.



Рисунок 3.11 – Залежність максимальної відносної похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК від відхилення тривалості процесу вимірювання від періоду мережі живлення при дії завади різної амплітуди

На рис. 3.12 [125] подано залежність максимальної похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК при дії завади великої амплітуди (32 мВ) від відхилення тривалості процесу вимірювання від номінальної тривалості періоду мережі 180 квантів при тривалості процесу вимірювання, вказаній в легенді (процес вимірювання продовжується до вказаної у легенді кількості періодів мережі живлення). Як видно з рис. 3.12, при зростанні тривалості процесу вимірювання похибка значно зменшується. Навіть при тривалості три періоди (60 мс) нею можна нехтувати.



Рисунок 3.12 – Залежність максимальної відносної похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК від тривалості процесу вимірювання

Таким чином, як видно з графіків рис. 3.11 і 3.12, запропонований підхід дав змогу забезпечити високу завадостійкість запропонованого методу вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів. При цьому мала похибка результату вимірювання отримана, по-перше, при дії завад відносно високої амплітуди (ця амплітуда навіть може перевищувати очікувані зміни напруги на мікроконтролері) і, по-друге, при досить значних допустимих відхиленнях тривалості процесу вимірювання від періоду мережі живлення. Таким чином, досліджений метод забезпечення завадостійкості системи вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів має високу ефективність і не суперечить виконанню сформульованих вище шести правил закінчення процесу вимірювань.

Висновки до розділу 3

1. Створено математичну модель споживання струму МК залежно від напруги його живлення. Вона необхідна для оцінки методичних похибок, притаманних вимірювальним каналам середнього енергоспоживання МК, запропонованих у попередньому розділі.
2. Математичну модель споживання струму МК пристосовано для реалізації у середовищі розробки та виконання програм LabView.
3. Розроблено стенд дослідження методичних похибок у середовищі розробки та виконання програм LabView.
4. Результати дослідження показали, що, у найгірших умовах, перша методична похибка (від неточного дотримання умови (2.9) – інтеграл зміни напруги на МК за час вимірювання його середнього енергоспоживання повинен прямувати до нуля) не перевищує 0,02%,

тому нею можна нехтувати.

5. Результати дослідження показали, що, у найгірших умовах, друга методична похибка (від неможливості точного виконання умови $\Delta E_C \rightarrow 0$) буде сягати декілька десятих відсотка. Однак її можна суттєво зменшити за рахунок вибору тактової частоти, ємності конденсатора та багатократного повторення досліджуваної інструкції або програми.
6. Результати дослідження показали, що, у найгірших умовах (завада близька до допустимої зміни напруги на МК, а відхилення часу інтегрування перевищує 5%), вплив завад на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК не перевищує 0,012%, чим можна нехтувати.

РОЗДІЛ 4

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

4.1 Архітектура інформаційно-вимірjuвальної системи

Як було показано у третьому розділі, запропоновані у другому розділі методи вимірювання середнього енергоспоживання імпульсних споживачів, зокрема МК, мають малі методичні похибки, тому можуть служити основою побудови відповідної ІВС. Як було показано у першому розділі, доцільно поєднати у одній ІВС запропоновані у другому розділі методи вимірювання середнього енергоспоживання МК з методами вимірювання його миттєвого енергоспоживання [99] для використання переваг обох методів та зменшення впливу їх недоліків.

В такому випадку слід провести аналіз можливості такого поєднання. Для цього розглянемо архітектуру ІВС миттєвого струму споживання МК та енергії виконання ним інструкцій (рис. 4.1) [99].

Як видно із архітектури, поданої на рис. 4.1 та переліку функцій поданого у § 1.4, ІВС миттєвого струму споживання МК [99] забезпечує повний цикл дослідження миттєвого енергоспоживання МК. Тому ІВС середнього струму споживання МК буде надбудовою до цієї ІВС. При цьому, якщо розглянути рис. 2.2 та 2.5, де подані вимірювальні схеми пропонуванних методів вимірювання середнього енергоспоживання МК, та рис. 1.7, де подано вимірювальну схему ІВС миттєвого струму споживання МК [99], то видно, що ці схеми мало відрізняються одна від одної. На схемах рис. 2.2 та 2.5 показані вимірювальні прилади (цифрові вольтметр та амперметр постійного струму, які на рис. 1.7 відсутні. Але ці прилади використовуються в складі ІВС миттєвого струму споживання МК [99] для калібрування вимірювального каналу (див.

рис. 3.2, 3.3, та 3.4 у [99]). Тому відмінності вимірювальних схем зводяться до того, які вимірювальні канали використовуються для вимірювання енергоспоживання МК. У схемі рис. 1.7 до вимірювальної схеми підключено два вимірювальні канали цифрового осцилографа. У схемах рис. 2.2 та 2.5 до МК підключено вимірювальний канал підсистеми регулювання струму стабілізатора струму та вимірювальний канал підсистеми вимірювання відведеної енергії при спрацюванні захисту. Ці вимірювальні канали між собою не конфліктують, однак, непрацюючі канали (входи цифрового осцилографа при вимірюванні середнього енергоспоживання та навпаки) слід відключати від вимірювальної схеми.

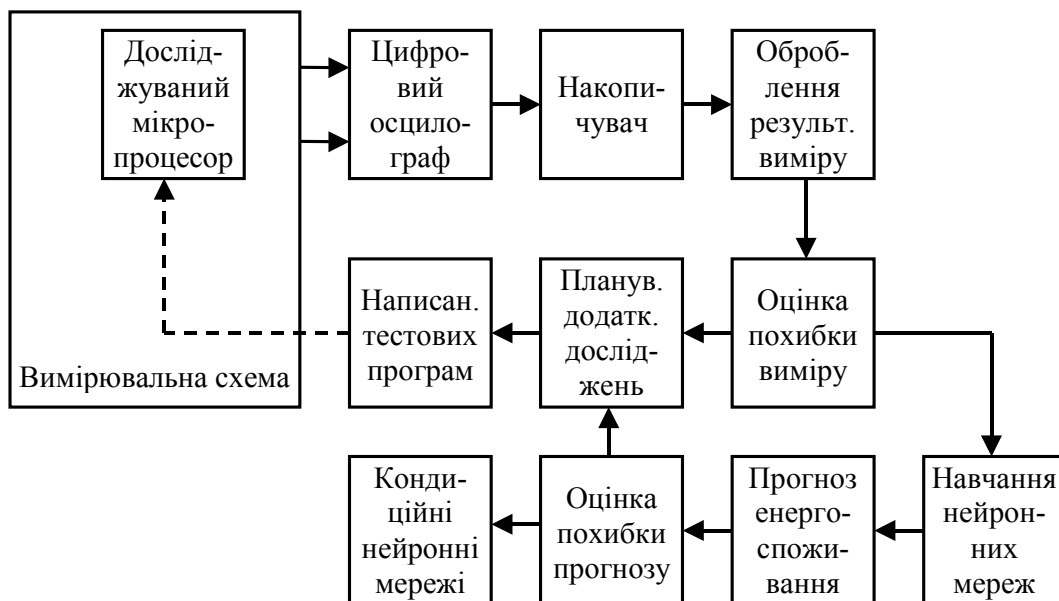


Рисунок 4.1 – Архітектура ІВС миттєвого струму споживання МК та енергії виконання ним інструкцій

При цьому ІВС середнього енергоспоживання МК, яка приєднується до ІВС миттєвого енергоспоживання МК, повинна включати наступні підсистеми:

1. перший вимірювальний канал підсистеми регулювання струму стабілізатора струму живлення МК;

2. другий вимірювальний канал підсистеми вимірювання відведеної енергії при спрацюванні захисту (при використанні методу, запропонованого у § 2.4, не використовується);
3. підсистему регулювання струму стабілізатора струму живлення МК, що аналізує результати вимірювання першого каналу та формує керуючу дію для зміни струму стабілізатора струму;
4. підсистему прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання, яка забезпечує виконання сформульованих у § 2.2 шести правил закінчення процесу вимірювання середнього енергоспоживання МК;
5. підсистему обчислення результату вимірювання середнього енергоспоживання МК. Ця підсистема видає результат вимірювання споживачу (при дослідженні енергоспоживання складних команд, програм або їх фрагментів) або на підсистему порівняння результату вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання МК (при дослідженні енергоспоживання інструкцій);
6. підсистему порівняння результату вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання МК. Результатом порівняння може бути заборона навчання нейронної мережі при значних розходженнях середнього та миттєвого енергоспоживання інструкцій.

Архітектура інтегрованої ІВС енергоспоживання МК подана на рис. 4.2. В ній перелічені вище підсистеми ІВС середнього енергоспоживання МК обведені штриховою лінією. Основні підсистеми – перший і другий вимірювальні канали та обчислення результату вимірювання середнього енергоспоживання МК – запропоновані у другому розділі. Висока якість цих методів підтверджена у третьому розділі шляхом аналізу їх методичних похибок – показано, що, при виконанні відповідних умов, методичні похибки не перевищують декількох сотих процента. Сама ІВС організована як дистрибутивна розподілена система [126-128] для можливості збільшення кількості робочих місць для стендів дослідження енергоспоживання МК.

Підсистема регулювання струму стабілізатора струму живлення досліджуваного МК виконується МК, що входить у цю підсистему. Ця підсистема розімкнута – зміна струму стабілізатора СС проводиться після закінчення попереднього вимірювання і визначення похибки виконання умови (2.9). Тому підсистема регулювання не схильна до самозбудження, а алгоритм регулювання ітераційний, керуюча дія обчислюється за формулою

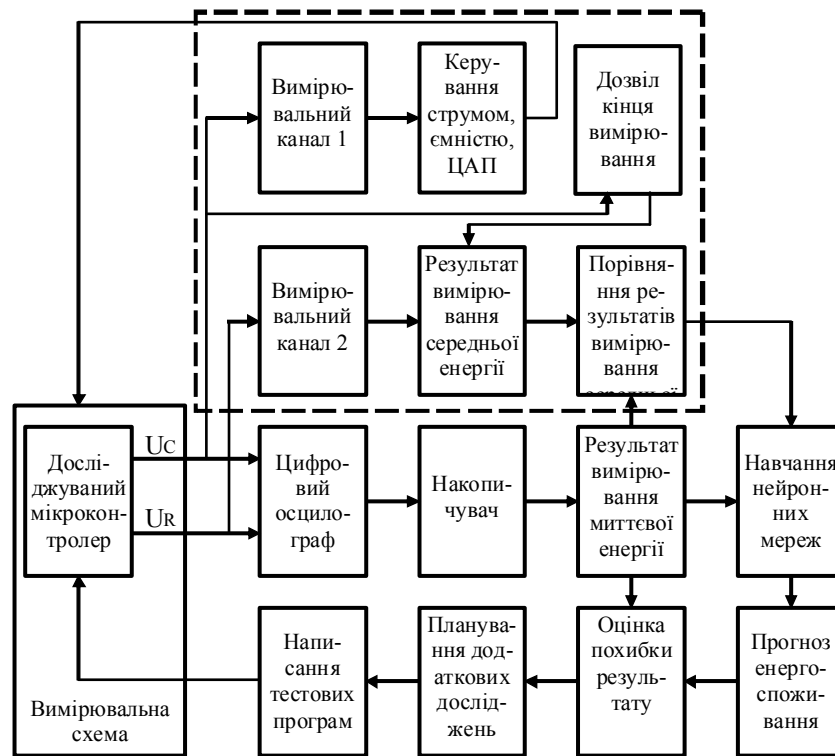


Рисунок 4.2 – Архітектура ІВС енергоспоживання МК

$$\Delta N_i = \Delta N_{i-1} \frac{\Delta I_i}{\Delta I_{i-1}}, \quad (4.1)$$

де ΔI_i , ΔI_{i-1} – зміни струму стабілізатора струму СС (див. рис. 2.2, 2.5), що мають компенсувати відхилення інтегралу зміни напруги на МК за час вимірювання від нуля, тобто неточне виконання умови (2.9), у поточному та попередньому циклах вимірювання;

ΔN_i , ΔN_{i-1} – зміни коду, які поступають на вхід керування струму стабілізатора струму СС (див. рис. 2.2, 2.5) у поточному та попередньому циклах вимірювання.

Підсистема прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання значно складніша, тому її слід розробити окремо.

Таким чином, у даному параграфі розроблено архітектуру ІВС енергоспоживання МК, яка поєднує методи вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання досліджуваного МК.

4.2 Апаратні засоби інформаційно-вимірювальної системи

Як було вказано, однією з важливих умов забезпечення високої точності та завадостійкості запропонованих у другому розділі методів вимірювання середнього енергоспоживання МК є своєчасне закінчення процесу вимірювання. При цьому необхідне одночасне виконання сформульованих у другому розділі шести правил. Однак, як було вказано далі, їх одночасне строге виконання цих умов малоімовірне, тому вони повинні бути виконані з деякими допусками.

Графіки, що пояснюють роботу підсистеми прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання подано на рис. 4.3. На ньому 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 (2.6) – зміна напруги на конденсаторі С в колі живлення МК не перевищує допустиме значення (є дозвіл від відповідного компаратора). Виконання умови (2.9) – зміна інтеграла напруги на конденсаторі С в колі

живлення МК не перевищує допустиме значення (дозвіл від регулятора РСС), перевіряється після кінця вимірювання. Крім того, вертикальними стрілками показано моменти закінчення виконання досліджуваним МК програми, енергоспоживання якої визначається.

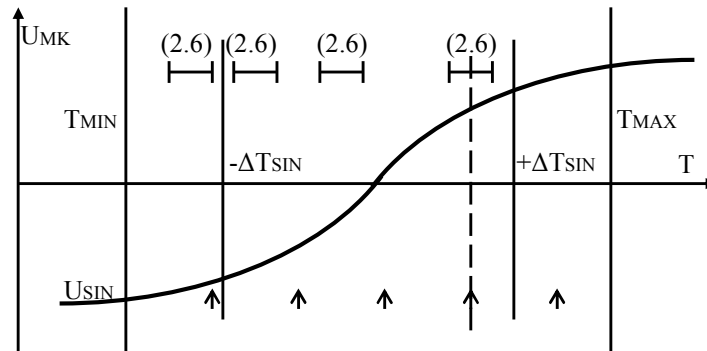


Рисунок 4.3 – Робота підсистеми прийняття рішення про закінчення вимірювання

Як видно з рис. 4.3, співпадання п'ятох із шести правил відбулося, воно відзначене штриховою лінією. Однак імовірність того, що воно може не відбутися – доволі велика. Шосте правило, виконання умови (2.9), можна оцінити лише по закінченні вимірювання. Тому, якщо шосте правило не виконане, слід повторити процедуру вимірювання заново. Якщо всі правила не виконуються декілька разів поспіль, необхідно змінити умови закінчення вимірювання – найефективніше встановити інші допуски на виконання умов (2.6) і (2.9).

Через необхідність постійного слідкування за виконанням кожної умови у реальному часі доцільне апаратне виконання підсистеми прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання. Структурна схема такого апаратного рішення подана на рис. 4.4.

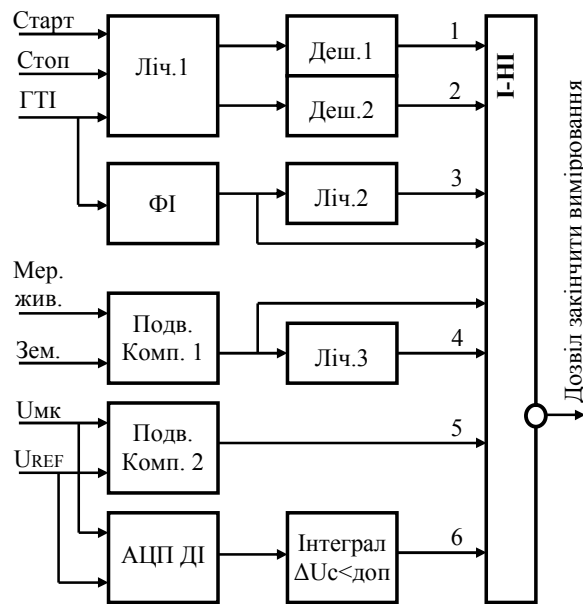


Рисунок 4.4 – Структура підсистеми прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання

Мінімальний та максимальний час вимірювання T_{MIN} , T_{MAX} формують лічильник Ліч.1 (підраховує тактові імпульси генератора досліджуваного МК) та дешифратори Деш.1 і Деш.2. За цими ж тактовими імпульсами формувач ФІ та лічильник Ліч.2 формує імпульси, що відповідають моментам закінчення виконання досліджуваним МК програми, енергоспоживання якої визначається. Допустимі межі $\pm \Delta T_{SIN}$, в яких забезпечується достатній захист від завад, формує подвійний компаратор Подв.Комп.1. Лічильник Ліч.3 використовується, коли час вимірювання перевищує один період мережі живлення. Для перевірки умови (2.6) використовується подвійний компаратор Подв.Комп.2. Для перевірки умови (2.9) використовується АЦП двохтактного інтегрування. Рішення про виконання умови (2.9) приймає за результатами вимірювання МК, що входить у склад АЦП двохтактного інтегрування. Всі дозволи об'єднуються схемою І, вихід якої дає дозвіл на закінчення вимірювання.

Всі структурні елементи підсистеми прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання можуть бути запроектовані відповідно до відомих

методів [74, 75, 91, 93]. При цьому доцільно уніфікувати вузли які повторюються – подвійні компаратори Подв.Комп 1 і 2 (див. рис. 4.4) та аналого-цифрові перетворювачі, які входять у склад вимірювальних каналів 1 і 2 (див. рис. 4.2).

Як подвійні компаратори Подв.Комп 1 і 2 (див. рис. 4.4) не можуть бути використані відомі компаратори – вони вимагають двополярного живлення. Але їх можна виконати на сучасних операційних підсилювачах, у яких діапазон зміни вихідної напруги наближається до сумарної напруги живлення. Схема уніфікованого подвійного компаратора подана на рис. 4.5. На входи Vx1 і Vx2, при використанні як Подв.Комп.1, подаються напруга мережі живлення з додаткової обмотки силового трансформатора та земля (див. рис. 4.4). При використанні як Подв.Комп.2 на входи Vx1 і Vx2 (див. рис. 4.4) подаються напруга на досліджуваному МК та вихідна напруга стабілізатора напруги СН (див. рис. 2.2 і 2.5). Поріг спрацювання для додатної напруги задається резистором R4 (див. рис. 4.5), а для від'ємної – резистором R5. Резистор R1 та конденсатор C1 становлять фільтр високочастотних завад.

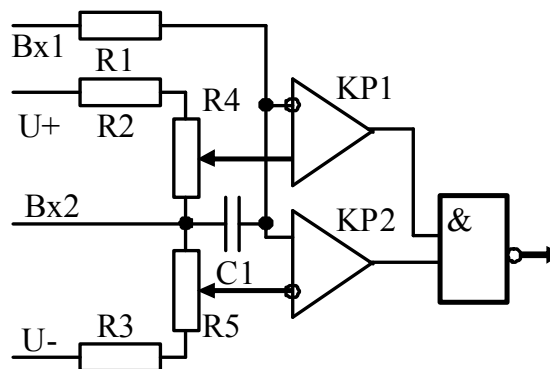


Рисунок 4.5 – Принципова схема уніфікованого подвійного компаратора

Також можна уніфікувати схеми АЦП двохтактного інтегрування, які використовуються у обох вимірювальних каналах. Особливістю цього АЦП двохтактного інтегрування є те, що, при використанні у складі вимірювального каналу 1, він повинен інтегрувати різницю напруг між стабілізатором напруги

СН (див рис. 2.2, 2.5) та живлення досліджуваного МК, а, при використанні у складі вимірювального каналу 2, він повинен інтегрувати спад напруги на резисторі схеми захисту, відносно виходу стабілізатора напруги СН (див рис. 2.2, 2.5). При використанні АЦП двохтактного інтегрування, які випускаються промисловістю, необхідно було би забезпечити гальванічну розв'язку обох АЦП двохтактного інтегрування як між собою, так і з вимірювальною схемою, що значно ускладнить конструкцію силового трансформатора [91]. Інакше неминуче виникнуть завади загального виду, які зведуть нанівець заходи з підвищення завадостійкості.

Крім того, як уніфікований АЦП ДІ неможливо використати АЦП, що випускаються як інтегральні уніфіковані мікросхеми. Справа у тому, що, відповідно до умов виконання шести правил закінчення процесу вимірювання (див. рис. 4.3), тривалість першого такту не може бути фіксованою. Так само не можна використати автопідстроювання тривалості першого такту, як це рекомендує, наприклад, [91], адже тривалість першого такту може бути щоразу іншою. Тому необхідно розробити спеціалізований АЦП ДІ. Схема такого уніфікованого АЦП двохтактного інтегрування подана на рис. 4.6.

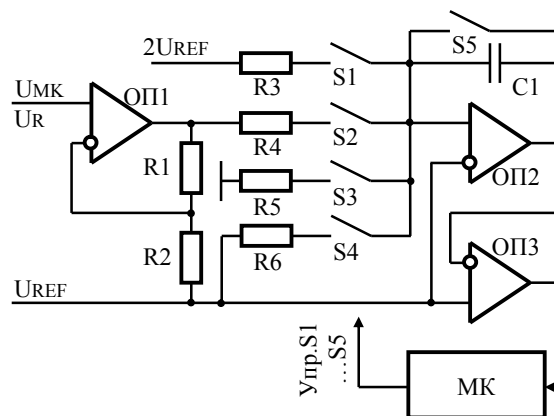


Рисунок 4.6 – Уніфікований аналого-цифровий перетворювач двохтактного інтегрування

В нього входять вхідний підсилювач на операційному підсилювачі ОП1 та резисторах R_1 , R_2 подільника зворотного зв'язку, інтегратор на операційному підсилювачі ОП2, конденсаторі C_1 та резисторах $R_3 \dots R_6$ і

ключах S1 ... S5, а також компаратор на операційному підсилювачі ОПЗ. Пристрій керування виконано на мікроконтролері МК.

Ключі S1 ... S4 підключають до входу інтегратора: S4 – уявну землю U_{REF} (при встановленні початкового стану перед вимірюванням); S2 – вихідну напругу підсилювача (під час вимірювання); S1 – напругу розряду інтегратора $2U_{REF}$ у другому такті (якщо вихідна напруга ОП2 в кінці першого такту додатна відносно уявної землі U_{REF}); S3 – землю для розряду інтегратора у другому такті (якщо вихідна напруга ОП2 в кінці першого такту від'ємна відносно уявної землі U_{REF}). Ключ S5 закорочує конденсатор C1 при встановленні початкового стану перед вимірюванням. Компаратор АЦП ДІ (операційний підсилювач ОПЗ) входить у склад МК типу AVR2313 [129].

Алгоритм роботи цього АЦП ДІ задає мікроконтролер МК. У стані очікування МК, що входить у склад АЦП ДІ, утримує замкнутими ключі S4 і S5. При цьому інтегратор онулений, напруга на конденсаторі C1 визначається зміщенням ОП2 та малим спадом напруги на опорі ключа S5 під дією струму через резистор R6. Опір резистора R6 вибрано відносно невеликим (10 кОм), а спад напруги на ньому не перевищує напруги зміщення ОП2, для вибраного операційного підсилювача OP277 [92] фірми Analog Devices не перевищує 50 мкВ. У цьому випадку струм резистора R6, викликаний зміщенням ОП2, не перевищує 5 нА. Вхідний струм ОП2 не перевищує 3 нА. Тоді сумарний струм резистора R6 становить 8 нА, а спад напруги на ключі від нього не буде перевищувати 0,2 мкВ, чим, порівняно із зміщенням ОП2, можна нехтувати.

При поступленні імпульсу запуску чергового вимірювання середнього енергоспоживання досліджуваного МК, МК, що входить у склад АЦП ДІ, розмакає ключі S4 і S5 та замикає ключ S2. Напругу заряду U_{C1}^I конденсатора C1 у першому такті можна визначити за формулою

$$U_{C1}^I = \frac{I_{R4} \cdot T^I}{C1} , \quad (4.2)$$

де T^I – тривалість першого такту інтегрування;

I_{R4} – струм резистора R4.

Після того, як підсистема прийняття рішень (див. рис. 4.4) прийняла рішення про закінчення вимірювання, МК, що входить у склад АЦП ДІ, розмакає ключ S2 і, залежно від полярності напруги на виході інтегратора (на виході ОП2, визначається компаратором на ОП3), замикає ключ S1 (при додатній полярності) або ключ S3 (при від'ємній полярності). Напругу розряду U_{C1}^II конденсатора C1 у другому такті можна визначити за формулою

$$U_{C1}^II = \frac{I_{R3} \cdot T^II}{C1}, \quad (4.3)$$

де T^II – тривалість другого такту інтегрування;

I_{R3} – струм резистора R3 (при додатній полярності) або R5 (при від'ємній полярності). Слід відзначити, що $R3 = R5$, тому $I_{R3} = I_{R5}$.

Прирівнявши (4.2) і (4.3), отримаємо

$$U_{C1}^I = \frac{I_{R4} \cdot T^I}{C1} = U_{C1}^II = \frac{I_{R3} \cdot T^II}{C1}. \quad (4.4)$$

А спростивши (4.4), для від'ємної вхідної напруги U_X отримаємо

$$U_X = U_{REF} \frac{R4}{R3} \cdot \frac{T^II}{T^I} \cdot K_{OP1} = U_{REF} \frac{R4}{R3} \cdot \frac{T^II}{T^I} \cdot \frac{R1 + R2}{R2}, \quad (4.5)$$

де U_X , U_{REF} – вимірювана та опорна напруги відповідно.

Для додатньої вхідної напруги U_X у рівності (4.5) необхідно замінити значення R_3 на R_5 , а також U_{REF} на $2U_{REF} - U_{REF}$.

Таким чином, МК, що входить у склад АЦП ДІ, повинен вимірювати тривалість першого і другого тактів інтегрування, та, після закінчення вимірювання обчислювати вхідну напругу U_X згідно (4.5). Обчислення слід проводити з 16-ти бітною точністю.

Похибка вимірювання уніфікованого АЦП двохтактного інтегрування (рис. 4.6) практично повністю визначається похибками стабілізаторів напруги U_{REF} і $2U_{REF}$ та резисторів $R_1 \dots R_6$ [130]. Однак при виготовленні АЦП двохтактного інтегрування повинен бути відкалібрований (значення напруги U_{REF} і $2U_{REF}$ та опору резисторів $R_1 \dots R_6$ повинні бути виміряні прецизійним тестером і записані у постійну пам'ять МК, який повинен при обчисленні результату вимірювання використовувати дійсні значення напруг і опорів а не номінальні), тому відхилення дійсних значень напруг U_{REF} і $2U_{REF}$, та резисторів $R_1 \dots R_6$ від номінальних не створюють похибку результату вимірювання. В такому випадку похибка АЦП двохтактного інтегрування визначається температурною та часовою нестабільністю цих елементів. Оцінка показала, що, при використанні вдосконалених стабілізаторів типу AD480 [131] фірми Analog Devices та метало-плівкових резисторів С2-29, похибка результату вимірювання АЦП двохтактного інтегрування не буде перевищувати 0,2%.

Таким чином, у даному параграфі розроблено структуру апаратних засобів ІВС енергоспоживання МК.

4.3 Алгоритми роботи інформаційно-вимірювальної системи

Програмне забезпечення ІВС енергоспоживання МК повинно поєднувати вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання досліджуваного

мікроконтролера. Кожен вид енергоспоживання має своє призначення. Результати вимірювання миттєвого енергоспоживання досліджуваного МК більш придатні для побудови компіляторів або програм аналізу енергоспоживання вже написаних програм. Результати вимірювання середнього енергоспоживання досліджуваного мікроконтролера більш придатні для оцінки дійсних результатів мінімізації енергоспоживання програм або їх фрагментів при їх тестуванні. Але результати оцінки енергоспоживання при розробленні програм та їх тестуванні повинні узгоджуватися між собою. Тому розроблювані алгоритми повинні передбачати не лише отримання результатів вимірювання енергоспоживання інструкцій, а і їх порівняння між собою.

Узагальнений алгоритм роботи підсистем ІВС середнього енергоспоживання досліджуваного МК подано на рис. 4.7 [132]. При використанні вимірювальної схеми рис. 2.5 операція зчитування результату перетворення інтегралу спаду напруги на резисторі захисту не потрібна.

Найскладніша та найважливіша підпрограма цього алгоритму передбачає забезпечення обмеження (2.9), тобто таке налаштування вихідного струму стабілізатора струму СС (див. рис. 2.2, 2.5), щоби інтеграл відхилення напруги живлення досліджуваного мікроконтролера від номінального значення, заданого стабілізатором напруги СН, не перевищував допустимого значення. Для вимірювальної схеми рис. 2.2 алгоритм роботи цієї підпрограми базується на обчисленні керуючої дії згідно (4.1).

Для вимірювальної схеми рис. 2.5 алгоритм роботи цієї підпрограми базується на алгоритмі прийняття рішень, розробленому у § 2.4. Цей алгоритм поданий на рис. 4.8. Він передбачає всі попередні установки компонентів вимірювальної схеми рис. 2.5, проведення циклу вимірювання та закінчення вимірювання на за сигналом підсистеми прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання. Якщо умови закінчення вимірювання не виконані, то приймається рішення про їх зміну на основі аналізу спрацювання фіксаторів виходу напруги на досліджуваному МК за задані межі відповідно до алгоритму, розробленому у § 2.4.

Одним з найважливіших для ІВС енергоспоживання мікроконтролерів є алгоритм порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК за миттєвою та середньою енергіями, поданий на рис. 4.9.



Рисунок 4.7 – Узагальнений алгоритм роботи підсистем ІВС середнього енергоспоживання МК

Цей алгоритм порівняння використовується в основному для виявлення результатів вимірювання енергії виконання окремих інструкцій, які мають велику похибку. Він передбачає вимірювання середнього енергоспоживання однієї інструкції, повтореної багато разів, або спеціальних наборів "підозрілих" інструкцій, та порівняння отриманого значення з результатами обчислення цієї енергії за результатами вимірювання енергії виконання однієї інструкції.

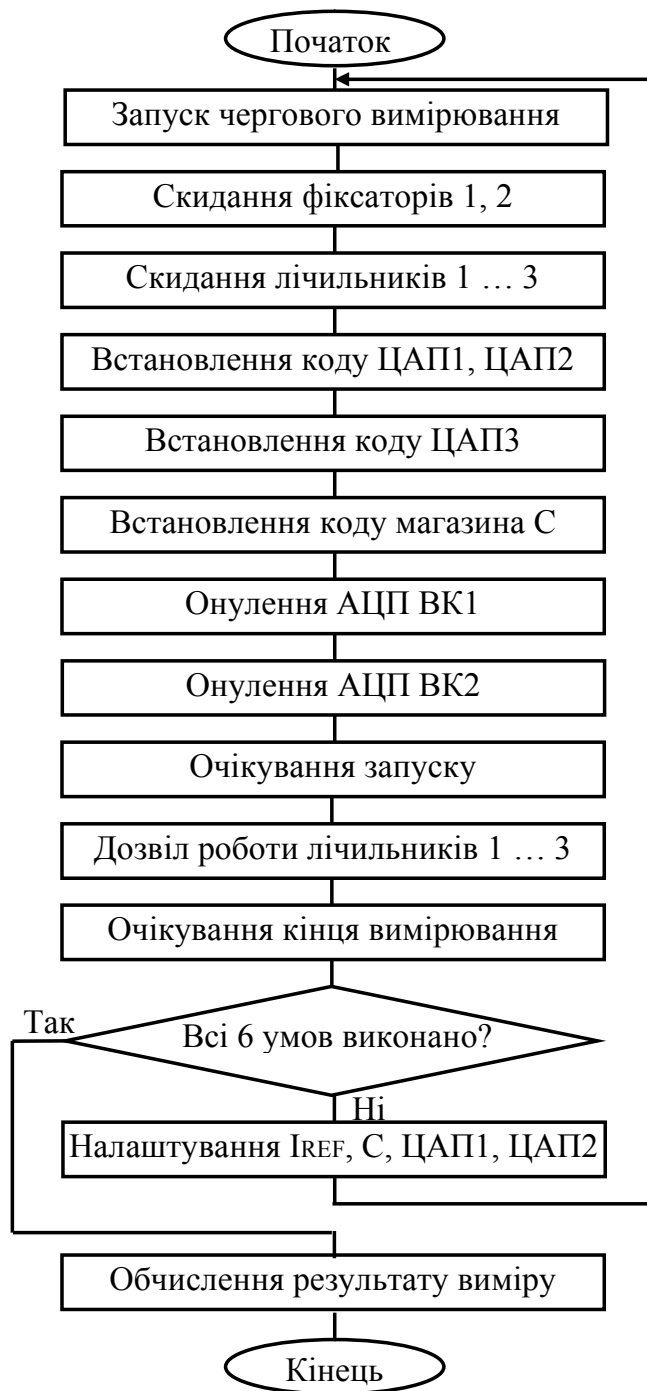


Рисунок 4.8 – Алгоритм налаштування струму стабілізатора струму СС для вимірювального каналу рис. 2.5

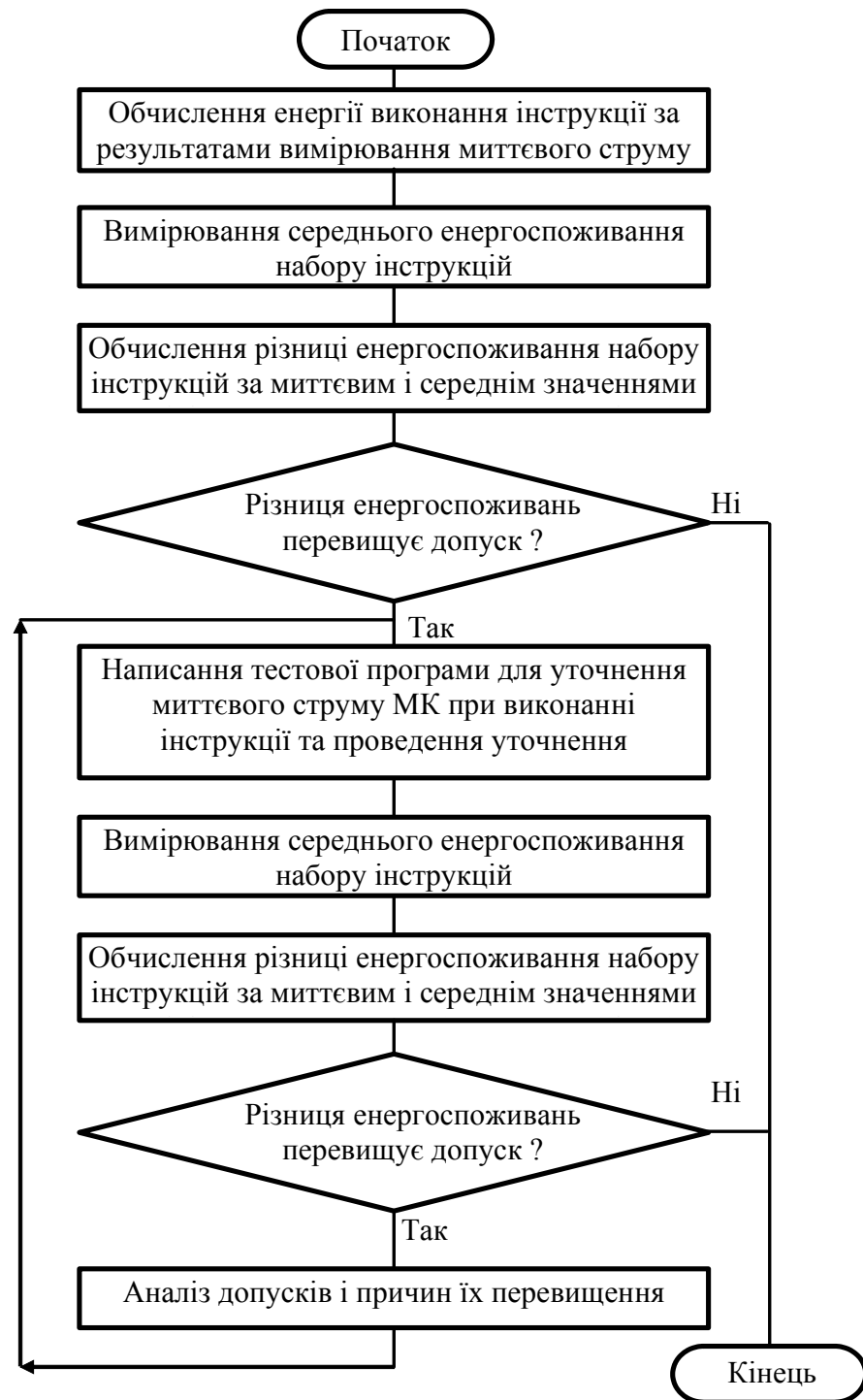


Рисунок 4.9 – Алгоритм порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК за миттєвою та середньою енергіями

Для виявлення причини невідповідності в алгоритмі рис. 4.9 передбачено написання спеціальних програм, аналіз допусків на виконання умов закінчення вимірювання і допустимого розходження енергій виконання наборів інструкцій за миттєвою та середньою енергіями.

Таким чином, в даному параграфі розроблено основні алгоритми роботи ІВС енергоспоживання МК, які забезпечують як вимірювання середнього енергоспоживання, так і взаємодію підсистем вимірювання миттєвого та середнього енергоспоживання, зокрема, порівняння отриманих ними результатів вимірювання.

4.4 Оцінка похибки інформаційно-вимірювальної системи

Похибка вимірювання миттєвого енергоспоживання оцінена у [99]. Тому тут слід оцінити лише похибку середнього енергоспоживання досліджуваного мікроконтролера. В свою чергу, як було вказано у § 3.1, похибка середнього енергоспоживання МК включає методичну та інструментальну складові. Методичні похибки запропонованих у другому розділі методів вимірювання середнього енергоспоживання МК були оцінені у третьому розділі. Тому в даному параграфі оцінимо інструментальні похибки вимірювання середнього енергоспоживання досліджуваного МК.

Згідно (2.15), у формулу обчислення результату вимірювання середнього енергоспоживання досліджуваного мікроконтролера входять результати вимірювання напруги U_{REF} стабілізатора напруги СН (див. рис. 2.2 і 2.5), струму I_{REF} стабілізатора струму СС, часу вимірювання T та енергії,

відведеної при спрацюванні захисту, яка рівна $\frac{U_{REF}}{R} \int_0^T u_R dt$. Оцінимо похибки

цих складових.

Вимірювання U_{REF} та I_{REF} ведуться на постійному струмі, тому слід використати цифровий тестер двохтактного інтегрування. Серед багатьох типів, які випускаються не менше, ніж двома десятками фірм, оптимальним за співвідношенням ціна/похибка для умов України є тестер UT70D [133]

польської фірми Unitra. При вимірюванні напруги $U_{REF} \approx 5 \text{ V}$ на діапазоні 8 V похибка не буде перевищувати $\delta_{UREF} \leq 0,1\%$, що цілком прийнятно. При вимірюванні струму в діапазоні $I_{REF} = 10 \dots 80 \text{ mA}$ на діапазоні 80 mA похибка не буде перевищувати $\delta_{IREF} = 0,5 \dots 0,25\%$, що надто багато. Однак можна значно зменшити δ_{IREF} за рахунок використання UT70D в режимі вольтметра, що вимірює спад напруги на відомому опорі R . Тоді, при використанні як резистора R магазину, наприклад, МСР-63 (допустима похибка $\delta_R \leq 0,05\%$), похибка вимірювання струму δ_{IREF} не буде перевищувати

$$\delta_{IREF} = \sqrt{\delta_{UREF}^2 + \delta_R^2} = \sqrt{0,075^2 + 0,05^2} \approx 0,09\% \quad . \quad (4.6)$$

Похибка часу вимірювання T мала, вона визначається похибкою кварцового резонатора (точніше, похибкою вимірювання його частоти), тобто не перевищує $\delta_T \leq 0,01\%$ у гіршому випадку. Цією похибкою, порівняно з $\delta_{UREF} \leq 0,1\%$, можна нехтувати.

Похибка вимірювання енергії, відведеної при спрацюванні захисту, яка рівна $\frac{U_{REF}}{R} \int_0^T u_R dt$, визначається похибками $\delta_{UREF} \leq 0,1\%$ вимірювання напруги $U_{REF} \approx 5 \text{ V}$ тестером UT70D, опору резистора R у схемі захисту та визначення інтегралу спаду напруги на цьому резисторі. У свою чергу похибка визначення інтегралу спаду напруги на резисторі R визначається похибкою АЦП, яка була оцінена у § 4.2. Серед цих похибок похибка АЦП $\delta_{ADC} \leq 0,2\%$ є, безумовно, домінуючою. Але слід відзначити, що відведена захистом енергія є, згідно (2.16), значно меншою за енергоспоживання МК. Можна вважати, що ця відведена енергія не повинна перевищувати 10% від енергоспоживання МК, інакше слід змінити ємність конденсатора C в колі живлення МК і заново налаштувати струм стабілізатора CC . Таким чином, вклад похибки

вимірювання енергії, відведеної при спрацюванні захисту, можна оцінити як $\delta_{INTEG} \leq \delta_{ADC} / 10 = 0,02\%$. Цією похибкою, порівняно з $\delta_{UREF} \leq 0,1\%$, можна нехтувати.

Таким чином, інструментальну похибку δ_{INS} ІВС середнього енергоспоживання МК можна оцінити як

$$\delta_{INS} = \sqrt{\delta_{UREF}^2 + \delta_{IREF}^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,09^2} \approx 0,15\%, \quad (4.7)$$

До значення інструментальної похибки δ_{INS} слід додати методичні похибки, оцінені у третьому розділі. Прийmemo, що перша методична похибка δ_{MET1} від неточного виконання обмеження (2.9) не перевищує максимально отриманого значення 0,02%, чим, порівняно з $\delta_{INS} \approx 0,15\%$, можна нехтувати. Другу методичну похибку δ_{MET2} від неточного виконання обмеження (2.6) можна, за рахунок відповідного вибору тактової частоти генератора МК, ємності конденсатора в колі живлення МК та мінімальної кількості виконуваних інструкцій, також можна звести до значення не більше 0,02% (як це показано у § 3.3). Тому цією методичною похибкою також можна нехтувати.

Отримане значення похибки $\delta_{ESUM} \approx \delta_{INS}$ є значно меншим (у 5 разів) за похибку ІВС миттєвого енергоспоживання МК, яка рівна 0,75% [99]. Тому ІВС середнього енергоспоживання МК може бути використана для перевірки результатів вимірювання ІВС миттєвого енергоспоживання МК.

В такому випадку похибка порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК, отриманих за допомогою ІВС миттєвого та ІВС середнього значень енергоспоживання буде меншою за похибку ІВС середнього значення енергоспоживання МК. Причиною цього є те, що при вимірюванні струму стабілізатора струму СС та напруги стабілізатора напруги СН в складі обох ІВС використовується один і той же тестер UT70D в одному і тому ж режимі роботи. Тобто внесена цим тестером похибка буде визначатися не його систематичною, а випадковою складовою похибки, яка у даних умовах

менша за систематичну складову похибки приблизно у 10 разів. Тому, при оцінці похибки порівняння, зроблені раніше висновки про можливість нехтування методичними похибками не можна вважати коректними. Врахування методичних похибок та похибки вимірювання енергії, відведеної захистом, дають результат оцінки 0,08%, що майже у два рази менше за похибку вимірювання ІВС середнього енергоспоживання МК та майже у 10 разів менше за похибку ІВС миттєвого енергоспоживання МК. Це означає, що взаємодія двох методів вимірювання енергоспоживання МК може бути дуже ефективною.

Таким чином, у даному параграфі проведено оцінку похибки вимірювання середнього енергоспоживання МК за допомогою розробленої ІВС, а також похибку порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК, отриманих за допомогою ІВС миттєвого та ІВС середнього значень енергоспоживання.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено архітектуру ІВС енергоспоживання МК, яка поєднує ІВС миттєвого енергоспоживання та ІВС середнього енергоспоживання. Метою поєднання є використання переваг методів вимірювання обох видів енергоспоживання МК та усунення недоліків кожного з методів за рахунок переваг іншого.
2. Розроблено апаратне забезпечення ІВС середнього енергоспоживання МК, яке включає підсистему прийняття рішень про дозвіл закінчення вимірювання, уніфікованим складовими частинами якої є подвійний компаратор та АЦП двохтактного інтегрування.

3. Розроблено програмне забезпечення ІВС середнього енергоспоживання МК, яке включає узагальнений алгоритм роботи підсистем ІВС середнього енергоспоживання МК, алгоритм налаштування струму стабілізатора струму СС для вимірювального каналу рис. 2.5 та алгоритм порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК за миттєвою та середньою енергіями.
4. Проведено оцінку похибки вимірювання ІВС середнього енергоспоживання МК та похибки порівняння результатів вимірювання енергоспоживання МК за миттєвою та середньою енергіями.

ВИСНОВКИ

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Al-Daajeh. Engineering Dependability to Embedded Systems Software via Tactics / Saleh H. Al-Daajeh, Rafa E. Al-Qutaish, Fuad Al-Qirem // International Journal of Software Engineering and Its Applications. — 2011. — Vol. 5, no. 4. — P. 45 - 62.
2. Поляков Антон. IDF 2005, нулевой день: нанотехнологии, платформы, энергопотребление [Электронный ресурс] / Поляков Антон.— 2005. — режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/processors/s25796/print/>.
3. Enrico Macii. The Ultra Low-Power Electronics and Design / Ed. by Enrico Macii//. — Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2004. — P. 273.
4. Clarke Peter. Embedded processor market to resist financial crisis, say VDC [Электронный ресурс] / Clarke Peter// EE Times : [s. n.], 2009. — September. — режим доступа: <http://www.eetimes.com/electronics-news/4194731/Embedded-processor-market-to-resist-financial-crisis-say-VDC>.
5. Joshi Anand. Embedded Systems: Technologies and Markets [Электронный ресурс] / Joshi Anand //BCC Research, Wellesley, MA, USA : [s. n.].—2012. — January. —режим доступа : <http://www.bccresearch.com/report/download/report/ift016e>.
6. Jackson Joab. IDC: Embedded systems market to double by 2015 [Электронный ресурс] / Jackson Joab//, IDC.— Framingham, MA, USA : IDG News Service, 2011. — September. — режим доступа : <http://www.networkworld.com/news/2011/090911-idc-embedded-systems-market-to-250716.html>.
7. Grant Martin. Systems, Controls, Embedded Systems, Energy, and Machines / Grant Martin, Luciano Lavagno, Hans Hansson [et al.]//— Boca Ration, FL, USA : CRC Taylor & Francis, 2006.— P. 16-1.

8. Chih-Wen Hsueh. Development of Architecture and Software Technologies in High- performance Low-power SoC Design / Chih-Wen Hsueh, Tien- Fu Chen, Rong-Guey Chang, Shi-Wu Lo // 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '05).— Hong Kong, China : IEEE Computer Society, 2005. — August, 17 - 19. — P. 475 - 480.
9. Alras M. Model-Based Design of Embedded Control Systems by Means of a Synchronous Intermediate Model / M. Alras, P. Caspi, A. Girault, P. Raymond // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICESS '09). — Hangzhou, Zhejiang, China : IEEE, 2009. — May, 25 - 27. — P. 3 - 10.
10. Embedded Systems Glossary [Электронный ресурс].— Gaithersburg, MD, USA : Barr Group, 2007. — November. режим доступа: http://www.barrgroup.com/Embedded- Systems/Glossary-E#embedded_system.
11. Gamatie A. A Case Study on Controller Synthesis for Data-Intensive Embedded Systems / A. Gamatie, Huafeng Yu, G. Delaval, E. Rutten // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICESS '09). — Hangzhou, Zhejiang, China : IEEE, 2009. — May, 25 - 27. — P. 75 - 82.
12. Instruction Level Power Measurements and Analysis: Deliverable : EASY/WP2/AUTH/DL/P/D15/B1 / Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece ; Executor: S. Nikolaidis, N. Kavvadias, P. Neofotistos : 2002. — March, 4.
13. Konstantakos V. In-Chip Configuration for Monitoring Power Consumption in Micro-processing Systems / V. Konstantakos, K. Kosmatopoulos, S Nikolaidis and Th. Laopoulos //, 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.156-161.
14. Theokharidis Michael. Energiemessung von ARM7TDMI Prozessor- Instruktionen : Master's thesis / Michael Theokharidis ; Technische Universtitat Dortmund.— Dortmund, Germany : [s. n.], 2000.— November.

- 15.Th. Laopoulos. Measurement of Current Variations for the Estimation of Software- Related Power Consumption / Th. Laopoulos, P. Neofotistos, C. A. Kosmatopoulos, S. Nikolaidis // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. — 2003.— Vol. 52, no. 4.— P. 1206-1212.
- 16.Talarico C. A New Framework for Power Estimation of Embedded Systems / C. Talarico, J.W. Rozenblit, V. Malhotra, A. Stritter // Computer.— 2005. — February. — Vol. 38, no. 2. — P. 71 - 78.
- 17.Macii Enrico. High-Level Power Modeling, Estimation, and Optimization / Enrico Macii, Massoud Pedram, Fabio Somenzi // IEEE Trans. On Computer Aided Design. — 1998. — Vol. 17. — P. 1061-1079.
- 18.Russell Jeffry T. Software Power Estimation and Optimization for High Performance 32-bit Embedded Processors [Электронный ресурс] / Jeffry T. Russell, Margarida F. Jacome // The International Conference on Computer Design.— Austin, TX, USA : IEEE, 1998. —October, 5 - 7. — P. 328 - 333.— режим доступа:<https://www.computer.org/csdl/proceedings/iccd/1998/9099/0/90990328-abs.html>.
- 19.Brandolese Carlo. Ultra Low-Power Electronics and Design / Carlo Brandolese, William Fornaciari, Fabio Salice // Ed. by Enrico Macii. — Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2004.— P. 156 - 171.
- 20.Kostas Zotos. Energy complexity of software in embedded systems [Электронный ресурс]/ Kostas Zotos, Andreas Litke, Er Chatzigeorgiou [et al.] // IASTED International Conference on Automation, Control and Applications (ACIT-ACA 2005).— Novosibirsk, Russia : ACTA Press, 2005. —June 20 - 24.— P. 146 - 150.— режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/nlin/0505007>.
- 21.Ng Mark. Designing Processor Power Consumption Using a CLPD [Электронный ресурс] / Mark Ng // Xcell Journal. — 2008. — Vol. 63. — P. 32 -36. — режим доступа: <http://www.xilinx.com/publications/archives/xcell/Xcell63.pdf>.

22. Zhu Hong. Software Design Methodology: From Principles to Architectural Styles [Электронный ресурс] / Hong Zhu. Computer science. — Burlington, MA : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.— P. 340.— ISBN: 9780750660754. — режим доступа:
<http://books.google.com.ua/books?id=rqRVbb0SKjEC>.
23. Ward M. A Deterministic Implementation Process for Accurate and Traceable System Timing and Space Analysis / M. Ward, N.C. Audsley // 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '07). — Daegu, Korea : IEEE Computer Society, 2007. — August, 21 - 24. — P. 432 - 440.
24. Simunic Tajana. Energy-Efficient Design of Battery-Powered Embedded Systems [Электронный ресурс] / Tajana Simunic, Luca Benini, Giovanni De Micheli // Proceedings of the IEEE Symposium on Low Power Electronics and Design. — San Diego, CA, USA : IEEE, 1999.— August, 16 - 17.— P. 212 - 217.— режим доступа:http://delivery.acm.org/10.1145/320000/313928/p212-simunic.pdf?ip=10.23.5.112&id=313928&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=223837E73163AEDA%2E7CA22F5EB1578DD1%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=622714817&CFTOKEN=54745926&__acm__=1464606258_4f7da85e8de0a283e97d3a9ab76e7a9c.
25. Chen Jian-Jia. Task Partitioning and Platform Synthesis for Energy Efficiency / Jian-Jia Chen, L. Thiele // 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '09).— Beijing, China : IEEE Computer Society, 2009. — August, 24 - 26. — P. 393 - 402.
26. Andrei S. Optimization of Real-Time Systems Timing Specifications / S. Andrei, A. M. K. Cheng // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06).— Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006.— August, 16 - 18. — P. 68 - 76.

27. Chen Jian-Jia. Energy-Efficient Scheduling for Real-Time Systems on Dynamic Voltage Scaling (DVS) Platforms / Jian-Jia Chen, Chin-Fu Kuo // 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '07).— Daegu, Korea : IEEE Computer Society, 2007. — August. — P. 28 - 38.
28. Lin Jian. Power-Aware Scheduling for Multiple Feasible Interval Jobs / Jian Lin, A.M.K. Cheng // 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '09).— Beijing, China : IEEE Computer Society, 2009.— August. — P. 191 - 200.
29. Kim Taewhan. Application-Driven Low-Power Techniques Using Dynamic Voltage Scaling / Taewhan Kim // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06).— Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006.— August, 16 - 18.— P. 199 - 206.
30. Marinoni M. Balancing Energy vs. Performance in Processors with Discrete Voltage/Frequency Modes / M. Marinoni, G. Buttazzo // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06).— Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006.— August, 16 - 18.— P. 294 - 304.
31. Huang Kai. Energy-Efficient Scheduling Algorithms for Periodic Power Management for Real-Time Event Streams / Kai Huang, Jian- Jia Chen, Lothar Thiele // 17th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '11).— Vol. 1.— Toyama, Japan : IEEE Computer Society, 2011.— August, 28 - 31. — P. 83 - 92.
32. Kei Fujii. Dynamic Voltage and Frequency Scaling for Real-Time Scheduling on a Prioritized SMT Processor / Kei Fujii, Hiroyuki Chishiro, Hiroki Matsutani, Nobuyuki Yamasaki // 17th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '11). — Vol. 2. — Toyama, Japan : IEEE Computer Society, 2011. — August, 28 - 31. — P. 9 - 15.

- 33.C. Na. Garbage Collector Scheduling in Dynamic, Multiprocessor Real-Time Systems / C. Na, H. Cho, B. Ravindran, E. D. Jensen // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06).— Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006.— August, 16 - 18.— P. 101 - 105.
- 34.Higuera-Toledano M.T. Towards an Analysis of Garbage Collection Techniques for Embedded Real-Time Java Systems / M.T. Higuera- Toledano // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06).— Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006.— August, 16 - 18.— P. 97 - 100.
- 35.Baruah S. Component-Based Design in Multiprocessor Real-Time Systems / S. Baruah, N. Fisher // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS '09).— Hangzhou, Zhejiang, China : IEEE, 2009. — May 25 - 27. — P. 209 - 214.
- 36.H. J. Eikerling. A Methodology for Rapid Analysis and Optimization of Embedded Systems / H. J. Eikerling, W. Hardt, J. Gerlach, W. Rosenstiel // IEEE Symposium and Workshop on Engineering of Computer Based Systems. — Friedrichshafen, Germany : IEEE Computer Society, 1996.— March, 11 - 15. — P. 252 - 259.
37. Dong-In Kang. A Voltage and Resource Synthesis Technique for Energy-Aware Real-time Systems / Dong-In Kang, S.P. Crago, Jinwoo Suh, J. McMahon // 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '07).— Daegu, Korea : IEEE Computer Society, 2007. — August, 21 - 24. — P. 20 - 27.
- 38.Jin Jian Xun. Energy Efficient Real-Time DVS based on Genetic Algorithm / Jin Jian Xun, Wang Huayong, Wun Nian [et al.] // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS '08). — Chengdu, Sichuan, China : IEEE, 2008.— July, 29 - 31.— P. 98 - 104.
- 39.Gilles O. Towards Model-Based Optimisations of Real-Time Systems, an Application with the AADL / O. Gilles, J. Hugues // 15th IEEE International

- Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '09).— Beijing, China : IEEE Computer Society, 2009. — August, 24 - 26. — P. 129 - 134.
40. Shengquan Wang. Energy-Efficient Speed Scheduling for Real-Time Tasks under Thermal Constraints / Shengquan Wang, Jian-Jia Chen, Zhenjun Shi, Lotar Thiele // 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '09). — Beijing, China : IEEE Computer Society, 2009.— August, 24 - 26.— P. 201 - 209.
41. Yang Yang. Software Synthesis for Distributed Embedded Systems: Ph.D. thesis / Yang Yang ; EECS Department. — University of California, Berkeley : [s. n.], 2012. — May, 4, 2012.
42. Chen Ching-Wen. Designing a High Performance and Low Energy consuming Embedded System with Considering Code Compressed Environments / Ching-Wen Chen, Chang-Jung Ku, Chih-Hung Chang // 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '05).— Hong Kong, China : IEEE Computer Society, 2005. — August, 17 - 19. — P. 317 - 322.
43. Deitel H. M. Java How to Program / H. M. Deitel, P. J. Deitel. — Seventh edition. — Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall, 2006.— P. 1692.
44. Robertson Christina. Analyzing the Software Aspect of an Embedded System's Power Consumption / Christina Robertson, Christopher J. Martinez // 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, (CCECE'11).— Niagara Falls, Ontario, Canada : IEEE, 2011. — May, 8 - 11. — P. 853 - 856.
45. C-T. Hsieh. Profile-Driven Program Synthesis for Evaluation of System Power Dissipation / C-T. Hsieh, M. Pedram, H. Mehta, F. Rastgar // DAC-34: ACM/IEEE Design Automation Conference. — Anaheim, CA : IEEE, 1997. — June. — P. 576-581.
46. Tony Givargis. Instruction-Based System-Level Power Evaluation of System-on-a-Chip Peripheral Cores / Tony Givargis, Associate Member, Frank Vahid

- [et al.] // The 13th International Symposium on System Synthesis (ISSS '00). — Madrid, Spain : IEEE Computer Society, 2000. — September, 20 - 22. — P. 163 - 169.
- 47.Mehta H. Instruction Level Power Profiling / H. Mehta, R.M. Owens, M.J. Irwin // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, (ICASSP-96). — Vol. 6.— Atlanta, GE, USA : IEEE, 1996. — May 7 - 10. — P. 3326 - 3329.
- 48.Borovyi A. Improved Sorting Methodology of Data-processing Instructions / A. Borovyi, V. Kochan, Th. Laopoulos, A. Sachenko // International Journal of “Computing”. — 2011. — Vol. V. 1. — P. 50 - 55.
- 49.Borovyi A. Improved Sorting Methodology of Data-processing Instructions / A. Borovyi, V. Kochan, Th. Laopoulos, Sachenko A. // Proceedings of the 6th International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI'10). — Brest, Belarus : BSTU, 2010.— P. 42 - 47.
- 50.Borovyi A. Neural-based Prediction of Power Consumption of Data-processing Instructions / A. Borovyi, V. Kochan, V. Turchenko [et al.] // Proceedings of the 5th International Conference on Neural Network and Artificial Intelligence (ICNNAI' 08).— Minsk, Belarus : BSUIR, 2008.— May. — P. 337-342.
- 51.Borovyi A. Predicting Power Consumption of CPU's Core for Base Cost of Data Processing Instructions / Andrii Borovyi, Volodymyr Kochan // Proceedings of the 2008 International Conference on Embedded Systems and Application (ESA'08). — Las Vegas, NV, USA : CSREA Press, 2008. — P. 47-51.
- 52.Marco A. Wehrmeister. Support for Early Verification of Embedded Real-time Systems Through UML Models Simulation [Електронний ресурс] / Marco A. Wehrmeister, Joao G. Packer, Luis M. Ceron // SIGOPS Operating Systems Review. — 2012. — February. — Vol. 46, no. 1. — P. 73 - 81.— режим доступу: <http://doi.acm.org/10.1145/2146382.2146396>.
- 53.Dhouib S. Model Driven High-Level Power Estimation of Embedded Operating Systems Communication Services / S. Dhouib, E. Senn, J.-P. Diguët

- [et al.] // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS '09).— Hangzhou, Zhejiang, China : IEEE, 2009. — May, 25 - 27. — P. 475 - 481.
54. Chapoutot A. Abstract Simulation: A Static Analysis of Simulink Models / A. Chapoutot, M. Martel // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS '09). — Hangzhou, Zhejiang, China : IEEE, 2009. — May, 25 - 27. — P. 83 - 92.
55. Hu Yu. Run-time Power Consumption Modeling for Embedded Multimedia Systems / Yu Hu, Qing Li, C.-C.J. Kuo // 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '05).— Hong Kong, China : IEEE Computer Society, 2005. — August, 17 - 19. — P. 353 - 356.
56. Hung Dang Van. Model Checking Real-time Component Based Systems with Blackbox Testing / Dang Van Hung, Bui Vu Anh // 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '05).— Hong Kong, China : IEEE Computer Society, 2005.— August, 17 - 19.— P. 76 - 79.
57. Isci Canturk. Runtime Power Monitoring in High-end Processors: Methodology and Empirical Data / Canturk Isci, Margaret Martonosi // The 36th International Symposium on Microarchitecture.— San Diego, CA, USA : IEEE Computer Society, 2003. — December, 3 - 5. — P. 93-104.
58. Sheayun Lee. An Accurate Instruction-Level Energy Consumption Model for Embedded RISC Processors [Электронный ресурс] / Sheayun Lee, Andreas Ermedahl, Sang Lyul Min [et al.] // The 2001 ACM SIGPLAN Workshop on Optimization of Middleware and Distributed Systems. — Snowbird, UT, USA : ACM, 2001. — June 18.— P. 1 - 10.— режим доступа: <http://delivery.acm.org/10.1145/390000/384201/p1-lee.pdf?ip=10.23.5.112&id=384201&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=223837E73163AEDA%2E7CA22F5EB1578DD1%2E4D4702B0C3E38B35%2E4>

[D4702B0C3E38B35&CFID=622714817&CFTOKEN=54745926&_acm_=1464611229_d188f1e3db039f79b714ed636c2deac0.](https://doi.org/10.1109/IDAACS.2011.6146112)

59. Borovyi A. Time-domain analysis of ARM7TDMI core instructions / A. Borovyi, V. Kochan, Th. Laopoulos, A. Sachenko // 2011 IEEE 6th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS).— Vol. 2.— Prague, Czech Republic : IEEE, 2011. —September, 15 - 17. — P. 785 - 790.
60. Zhang Wei. Accurately Estimating Worst-Case Execution Time for Multi-core Processors with Shared Direct-Mapped Instruction Caches / Wei Zhang, Jun Yan // 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '09).— Beijing, China : IEEE Computer Society, 2009.— August, 24 - 26.— P. 455 - 463.
61. Barre J. Modeling Instruction-Level Parallelism for WCET Evaluation / J. Barre, C. Landet, C. Rochange, P. Sainrat // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06).— Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006. — August, 16 - 18. — P. 61 - 67.
62. Chakrabarti Chaitali. Instruction Level Power Model of Microcontrollers / Chaitali Chakrabarti // In IEEE International Symposium on Circuits and Systems, (ISCAS '99).— Orlando, FL, USA : IEE, 1999.— May 30 - June 2. — P. 76 - 79.
63. Mingsong Lv. ARMISS: An Instruction Set Simulator for the ARM Architecture / Mingsong Lv, Qingxu Deng, Nan Guan [et al.] // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS '08).— Chengdu, Sichuan, China : IEEE, 2008. — July, 29 - 31. — P. 548 - 555.
64. Instruction Level Power Analysis and Low Power Design Methodology of a Microprocessor: Rep. / Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of Berkely ; Executor: Peggy Laramie : 1998.
65. Mehta H. Instruction Level Power Profiling / H. Mehta, R.M. Owens, M.J. Irwin // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal

- Processing, (ICASSP-96). — Vol. 6.— Atlanta, GE, USA : IEEE, 1996. — May 7 - 10. — P. 3326 – 3329.
66. Ben Klass. Modeling Inter-Instruction Energy Effects in a Digital Signal Processor / Ben Klass, Donald E. Thomas, Herman Schmit, David F. Nagle // Power-Driven Microarchitecture Workshop, in conjunction with Intl. Symposium on Computer Architecture. — Barcelona, Spain : IEEE Computer Society, 1998.— June, 28. — P. 1 - 7.
67. Amela Xavier. ARM Instruction Set Energy Models and Power Simulation Tools (ARM7TDMI) / X. Amela, J. Figueras, S. Manich, J. Rius, R. Rodriguez, A. Rubio // Universitat politècnica de catalunya, — 2001.— March, Barcelona.
68. Wang Zhonglei. Flow Analysis on Intermediate Source Code for WCET Estimation of Compiler-Optimized Programs / Zhonglei Wang, A. Herkersdorf // 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '09).— Beijing, China : IEEE Computer Society, 2009.— August, 24 - 26.— P. 22 - 27.
69. Schafer B.C. Temperature-Aware Compilation for VLIW Processors / B.C. Schafer, Yongho Lee, Taewhan Kim // 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '07).— Daegu, Korea : IEEE Computer Society, 2007. — August, 21 - 24. — P. 426 - 431.
70. Cooper Keith D. Adaptive Optimizing Compilers for the 21st Century / Keith D. Cooper, Devika Subramanian, Linda Torczon // Journal of Supercomputing. — 2001. — Vol. 23. — P. 7-22.
71. Alfred V. Aho. Compilers: Principles, Techniques, and Tools (2nd Edition) / Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, Jeffrey D. Ullman. — Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006.— ISBN: 0321486811.
72. S. Nikolaidis. Instruction-level Power Measurement Methodology: Deliverable : EASY/WP2/AUTH/DL/P/D8/B1 / Aristotle University of Thessaloniki ;

- Executor: S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos. — Thessaloniki, Greece : 2002. —4, March.
- 73.S. Nikolaidis. Instruction level energy modeling for pipelined processors / S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos [et al.] // Journal of Embedded Computing. — 2005. — Vol. 1. — P. 317-324.
- 74.Шевкопляс Б.В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения. Справочник. 2-е издание, переработанное и дополненное / Шевкопляс Б.В. —М.: Издательство «Радио и связь», 1990.—513 с.
- 75.Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники электрические цепи. Издание девятое, переработанное и дополненное / Бессонов Л. А. — М.: «Высшая школа», 1996.—623 с.
- 76.Tiwari Vivek. Instruction level power analysis and optimization of software / Vivek Tiwari, Sharad Malik, Andrew Wolfe, Mike Tien chien Lee // Journal of VLSI Signal Processing. — 1996. — Vol. 13. — P. 1-18.
- 77.Tiwari Vivek. Power Analysis of Embedded Software: A First Step Towards Software Power Minimization [Электронный ресурс] / Vivek Tiwari, Sharad Malik, Andrew Wolfe // IEEE Transactions on VLSI Systems. — 1994. — Vol. 2. — P. 437 - 445. — режим доступа:
<http://dit.upc.es/lpdntt/biblio/BREUS/TIW94a.pdf>.
- 78.Tiwari Vivek. Power Analysis of a 32-bit Embedded Microcontroller [Электронный ресурс] / Vivek Tiwari, Mike Tien-Chien Lee // VLSI Design Journal.— 1998.— Vol. 7, no. 3.— P. 225-242.— режим доступа:
<http://dit.upc.es/lpdntt/biblio/BREUS/TIW98a.pdf>.
- 79.Цифровые мультиметры Fluke 80 серии V / [Электронный ресурс].— режим доступа:<http://www.fluke.com/fluke/ruru/Cifrov%D1%8Be-multimetr%D1%8B/Fluke-80-Series-V-87V-83V-87V-E2-Kit.htm?PID=56135>
- 80.Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. / Х. Кухлинг. — М.: Мир, 1985.— 520 с.

81. Happel B. L. M. The Design and Evolution of Modular Neural Network Architectures [Электронный ресурс] / B. L. M. Happel, J. M. J. Murre // Neural Networks.— 1994.— Vol. 7.— P. 985-1004.— режим доступа: <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.54.8248>.
82. Куссуль, М. Э. Графы модульных нейронных сетей [Электронный ресурс] / М. Э. Куссуль // Математические машины и системы.— 2005.— Т. 1.— С. 26-38 —
режим доступа: http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2005/2005_1/Kussul_01_2009.pdf.
83. Галинская А. А. Модульные нейронные сети: обзор современного состояния разработок / А. А. Галинская // Математические машины и системы. — 2003. — Т. 3,4. — С. 87-102.
84. Hornik K. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators / K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White // Neural Networks.— 1989. — Vol. 2, no. 5. — P. 359-366.
85. Хайкин, Саймон. Нейронные сети: Полный курс / Саймон Хайкин. — 2 изд. — [Б. м.] : Вильямс, 2006.— 1103 с.
86. Головкин В. А. Нейронные сети: обучение, организация и применение: Учеб. пособие по направлению Прикл. математика и физика / В. А. Головкин, А. И. Галушкин. — М.: Изд. предприятие ред. журн. “Радиотехника”, 2001.—256 с.
87. Rumelhart D. Learning Representation by Back-propagation Errors [Электронный ресурс] / D. Rumelhart, G. Hinton, R. Williams // Nature.— 1986.— Vol. 323.— P. 533-536.— режим доступа : <http://www.cs.toronto.edu/~hinton/absps/naturebp.pdf>.
88. Kavvadias N. Measurements Analysis of the Software-related Power Consumption in Microprocessors / N. Kavvadias, P. Neofotistos, S. Nikolaidis [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.— 2004. — August. — Vol. 53, no. 4. — P. 1106- 1112.

89. Chang Naehyuck. Cycle-accurate Energy Consumption Measurement and Analysis: Case Study of ARM7TDMI [Електронний ресурс] / Naehyuck Chang, Kwanho Kim, Hyung Gyu Lee // Proceedings of The 2000 International Symposium on Low Power Electronics and Design.— New York, NY, USA : ACM, 2000.—Р. 185 -190. — режим доступу : http://www.cs.york.ac.uk/rts/docs/SIGDA-Compendium-1994-2004/papers/2000/islped00/pdffiles/08_2.pdf.
90. Щербаков В.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник / В.И. Щербаков, Г.И. Грездов. — К.: Техніка, 1983. — 213 с.
91. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства. Учебное пособие для вузов. / Кончаловский В.Ю. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 304 с.
92. Быстродействующие усилители (Полоса ≥ 50 МГц) [Електронний ресурс] / — режим доступу : <http://www.analog.com/ru/products/amplifiers/operational-amplifiers/rail-to-rail-amplifiers/ada4855-3.html>.
93. Кашкаров А. П. Популярный справочник радиолюбителя / Кашкаров А. П. — М.: РадиоСофт 2008. — 416 с.
94. Боровий А. Аналіз схем дослідження енергії виконання команд мікропроцесора / А. Боровий, В. Кочан // Вісник Хмельницького національного університету. — 2007.— Т. 15, № 2.— С. 105-109.
95. Borovyi A. Analysis of Circuits for Measurement of Energy of Processing Units / A. Borovyi, V. Konstantakos, V. Kochan [et al.] // 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. 42-47.
96. Пат. 90922 Україна, МПК (2009) C05E 5/00 C01K 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів / А. Боровий, І. Майків, Р. Кочан, З. Домбровський, В. Кочан.; заявник і патентовласник А. Боровий,

- I. Майків, Р. Кочан, З. Домбровський, В. Кочан — № а 2008 06325 ; заявл. 13.05.2008 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. №11.
97. Боровий А. Стенд дослідження миттєвого значення струму споживання мікропроцесора / А. Боровий, В. Кочан, В. Турченко // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. — 2009. — Т. 1. — С. 131-137.
98. Borovyi A. Device for Measuring Instant Current Values of CPU's Energy Consumption / A. Borovyi, V. Kochan, Z. Dombrovskyy [et al.] // 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. 126-130.
99. Боровий А. М. Інформаційно-вимірювальна система дослідження параметрів енергоспоживання мікропроцесорів: дис. канд. техн. наук : 05.13.05 / Боровий Андрій Модестович. – Тернопіль : ТНЕУ, 2012. – 266 с.
100. Боровий А. Метод калібрування системи вимірювання енергії імпульсних споживачів / А. Боровий, О. Гавришок, Н. Возна // Матеріали Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції / Тернопільський національний технічний університет ім. Ів. Пулюя. — Т. 1.— Тернопіль : ТНТУ, 2010. — Квітень. — С. 271.
101. Боровий А. Нейромережевий метод прогнозу енергоспоживання процесорного ядра при виконанні інструкцій опрацювання даних / А. Боровий, В. Кочан // Науковий вісник Чернівецького університету. — 2009. — № 446. — С. 41-48.
102. Боровый А. Использование нейронных сетей для оценки энергии выполнения команд микропроцессором / А. Боровый, В. Константакос, В. Кочан [и др.] // Вестник Брестского Технического Университета. Серия: Физика, математика, информатика. — 2007. — № 7. — С. 10-13.

103. Боровий А. Проблеми побудови моделі енергоспоживання процесорного ядра / А. Боровий, О. Гавришок, В. Кочан, З. Домбровський // Труды десятой международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” / Одеський Національний Політехнічний Університет. — Т. 1. — Одеса : Політехперіодика, 2009. — 18 - 22 травня. — С. 157.
104. Borovyi A. Using Neural Network for the Evaluation of Power Consumption of Instructions Execution / A. Borovyi, V. Konstantakos, V. Kochan [et al.] // Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology IMTC 2008.— Vancouver, BC, Canada : IEEE, 2008.— 12 - 15 May.— P. 676 - 681.
105. Патент 110142 України, МПК G01R 11/00, G01R 21/00, G05F 5/00. Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача та пристрій для його реалізації / Осолінський Олександр Романович, Кочан Володимир Володимирович, Домбровський Збишек Іванович, Кочан Орест Володимирович; заявник і патентовласник Осолінський Олександр Романович, Кочан Володимир Володимирович, Домбровський Збишек Іванович, Кочан Орест Володимирович;— № а 2014 03292; заявл. 31.03.14; опубл. 25.11.15, Бюл. №22.
106. 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.
107. 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.
108. 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.
109. 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.
110. Осолінський А.Р. Стенд дослідження методических погрешностей системи вимірювання середнього енергопотреблення мікроконтролерів / А.Р. Осолінський, О.В. Кочан // Вестник брестського державного технічного університету. – 2015. – №5 (95). – С. 6-9.
111. Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача та пристрій для його реалізації: Заявка № а201506563, Україна: G01R 5/00; заявники Осолінський Олександр Романович, Кочан Володимир Володимирович, Домбровський Збішек Іванович, Кочан Оrest Володимирович.
112. Осолінський О.Р. Вдосконалена система вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів / О.Р. Осолінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – №3. – С. 104-108.
113. National Instruments. — LabView Tutorial Manual [Електронний ресурс], 1996. — режим доступу : <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>.
114. Nikolaidis S. Instruction-level Power Models for Embedded Processors : Deliverable : EASY/WP2/AUTH/DL/I/D21/B1 / Aristotle University of

- Thessaloniki ; Executor: S. Nikolaidis, N. Kavvadias, P. Neofotistos.—
Thessaloniki, Greece : 2002. — December.
115. Xiang Zhou Design and Implementation of an Improved C Source-Code Level Program Energy Model / Xiang Zhou, Bing Guo, Yan Shen, Qi Li // International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS '09).— Hangzhou, Zhejiang, China : IEEE, 2009. —May, 25 - 27.— P. 490 - 495.
116. Markus Levy. Understanding the Real Energy Consumption of Embedded Microcontrollers [Электронный ресурс] /Markus Levy//.— режим доступа:<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jun/understanding-the-real-energy-consumption-of-embedded-microcontrollers>.
117. Pat. 6,002,878 US, G01R31/30; G06F11/24; G06F11/267. Processor Power Consumption Estimator That Using Instruction and Action Formulas Which Having Average Static and Dynamic Power Coefficients / John B. Gehman, Kerry Lucille Johns-Vano, Colleen Kate Steward ; Assignee Motorola, Inc. (Schaumburg, IL).— № 08/886,505 ; applied: 01.07.1997 ; published: 14.12.1999.
118. Stefan Steinke. An Accurate and Fine Grain Instruction-level Energy Model Supporting Software Optimizations / Stefan Steinke, Markus Knauer, Lars Wehmeyer, Peter Marwedel // International Workshop on Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation (PATMOS).— Yverdon- Les-Bains, Switzerland : IEEE, 2001. — September, 26 - 28.
119. Jaiantilal Abhishek. Modeling CPU Energy Consumption for Energy Efficient Scheduling [Электронный ресурс] / Abhishek Jaiantilal, Yifei Jiang, Shivakant Mishra // The 1st Workshop on Green Computing. — Bangalore, India : ACM, 2010. — November, 29 - December, 3. — P. 10 - 15.— режим доступа: <http://doi.acm.org/10.1145/1925013.1925015>.
120. Gebotys Catherine H. An Empirical Comparison of Algorithmic, Instruction, and Architectural Power Prediction Models for High Performance Embedded DSP Processors [Электронный ресурс] / Catherine H. Gebotys, Robert J. Gebotys // Proceedings of the International Symposium on Low

- Power Electronics and Design. — Monterey, California, USA : ACM, 1998.— August, 10 - 12.— P. 121 - 123.— режим доступу: http://delivery.acm.org/10.1145/290000/280824/p121-gebotys.pdf?ip=10.23.5.112&id=280824&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=223837E73163AEDA%2E7CA22F5EB1578DD1%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=792949152&CFTOKEN=14434605&_acm_=1464672828_d60de7445d334baef8d22a468834e8d3.
121. Villarreal, Omar Esli Jimenez. A Flexible High Level Modelling Methodology for Power and Energy Consumption [Електронний ресурс] : Master Thesis / Omar Esli Jimenez Villarreal ; Computer Engineering. — Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology : [s. n.], 2011. — October.— режим доступу: <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:b9d4d0e9-f81f-46e9-8ab4-b0e9935d3e33/Thesis-report-OmarJimenez-CE-EWI.pdf>.
122. 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.
123. 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.
124. Осолінський О.Р. Дослідження методичної похибки при вимірюванні середнього енергоспоживання мікроконтролерів / Осолінський О.Р.// Вісник Тернопільського національного технічного

університету ім. Івана Пулюя ім. Івана Пулюя. — 2016. — №1, (81) — С. 118-124

125. Oleksandr Osolinsky Research of Interference immunity of the System for Measuring the Average Energy Consumption of Microcontrollers / Oleksandr Osolinsky // 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, 2014. — P.284-288.
126. 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.
127. 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.
128. 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.
129. Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash . – [Електронний ресурс]. — режим доступу: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1919.pdf.
130. Описание типов резисторов. — [Електронний ресурс]. – режим доступу: <http://www.tensor-nn.ru/@info.htm>.

131. High Precision Reference. — [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.analog.com/en/other-products/militaryaerospace/ad780/products/product.html>.
132. Навчальний посібник основи алгоритмізації та програмування мовами c++, visual basic, turbo pascal [Електронний ресурс] / [Азарян А.А., Карабут Н.О., Козикова Т.П. та ін.]. —Кривий-ріг: ОктанПринт, 2014. — 308 с. —режим доступа: <http://mpz.knu.edu.ua/lib/algoritm.pdf>.
133. UT70D Современный цифровой многоцелевой мультиметр [электронный ресурс] —режим доступа: http://tehmer.kiev.ua/ru/produkcija/multimetri_unit/UT70D.php.

Додаток А

Акт впровадження ТЗОВ "Елекс"

eleks®

Ternopil Department

ЗАТВЕРДЖЕНО

Керівник Тернопільської філії
ТЗОВ "Елекс"

Цебрій О.Р.

"1" 04



А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
Осолінського Олександра Романовича на тему
"Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів"
на ТЗОВ "Елекс"

Ми, комісія у складі:

Голова Цебрій О.Р.

Члени комісії Цебрій Ю.С.
Палій І.О.

з 01.02.2016р. по 19.02.2016р. оцінили результати дисертаційної роботи Осолінського Олександра Романовича на тему "Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів" і прийшли до висновку, що ТЗОВ "Елекс" зацікавлене у впровадженні наступних результатів цієї дисертаційної роботи:

1. для оцінки енергоспоживання програмного забезпечення, що будуть використанні в проєктах по розробці аплікацій для мобільних пристроїв під управлінням ОС iOS, Android;
2. для оцінки енергоспоживання програмованих логічних матриць, за допомогою яких планується реалізація проєктів розробки аплікацій для вбудованих систем.

Ми стверджуємо, що методи та засоби, запропоновані у дисертаційній роботі Осолінського Олександра Романовича на тему "Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів" можуть бути успішно використані при виконанні перелічених вище проєктів.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії
Члени комісії

Цебрій О.Р.
Цебрій Ю.С.
Палій І.О.

Адреса: пр-т Злуки, 3а, м. Тернопіль, 46010

Контактні телефони: 0352400096, 0673531575

Додаток Б

Акт впровадження "Сайпрес Семікондактор"



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Осолінського Олександра Романовича “ Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів ”, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Даний акт складений у тому, що результати дисертаційної роботи Осолінського О.Р. “Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів” використані при оцінці енергоспоживання процесорних систем на кристалі PSoC1,3,4,4-BLE,5 (CY8C28, CY8C38, CY8C41/42, CY8C41/42-BLE, CY8C55) фірми «Cypress Semiconductor», зокрема:

метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, який за рахунок живлення схеми від стабілізатора струму, який налаштовується перед вимірюванням та використанню метода двохтактного інтегрування, забезпечує високу точність вимірювання споживання енергії мікроконтролером при виконанні інструкцій, команд, програм та їх фрагментів.

Фірмі «Cypress Semiconductor» передано структурні схеми апаратних компонентів інформаційно-вимірювальної системи та алгоритми функціонування програмного забезпечення.

Впровадження перерахованих вище результатів дисертаційного дослідження Осолінського О.Р. при аналізі енергії виконання інструкцій модулів PSoC1,3,4,5 дозволило проводити оптимізацію програмного забезпечення для даних модулів за енергоспоживанням, а саме покращити споживчі якості продуктів з автономним живленням, зокрема систем з вбудованим Bluetooth Low Energy прийомо-передавачем.

Консультант фірми «Сайпрес Семікондактор»

К. Т.Н., доцент

Кремінь В.Т.

Додаток В

Акт впровадження ТОВ "Світлоцентр"

ЗАТВЕРДЖЕНО
 Директор ТОВ «Світлоцентр»
 Яремчук В.М.
 " " 2016р.



А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
 Осолінського Олександра Романовича на тему
 "Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів"
 на (Товариство з обмеженою відповідальністю "Світлоцентр")

Ми, комісія у складі:

Голова директор, Яремчук В.М.
 Члени комісії головний інженер, Прозоровський М.О.
 Інженер, Мишка І.І.

Даний акт складений у тому, що результати дисертаційної роботи Осолінського О.Р. "Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів" використані при оцінці енергоспоживання програмного забезпечення, яке буде розроблятися для контролерів (STN 32F 103) заряду акумуляторних блоків в системах автономного енергозабезпечення в рамках проекту «Інноваційні енергоефективні заходи вуличного освітлення в селі Сівка-Войнилівська. Реконструкція з використанням відновлювальних джерел енергії (енергія сонця)», спільно з Програмою розвитку ООН (Проект «Місцевий розвиток орієнтований на громаду») розташований за адресою: Івано-Франківська область, Калуський район, село Сівка-Войнилівська; зокрема:

метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, який за рахунок живлення схеми від стабілізатора струму, який налаштовується перед вимірюванням та використанню метода двохтактного інтегрування, забезпечує високу точність вимірювання споживання енергії мікроконтролером при виконанні інструкцій, команд, програм та їх фрагментів.

Фірмі ТОВ «Світлоцентр» передано структурні схеми апаратних компонентів інформаційно-вимірювальної системи та алгоритми функціонування програмного забезпечення.

Впровадження перерахованих вище результатів дисертаційного дослідження Осолінського О.Р. при аналізі енергії виконання інструкцій модулів (вказати типи мікроконтролерів), дозволило проводити оптимізацію програмного забезпечення для даних модулів за енергоспоживанням.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії
 Члени комісії



Яремчук В.М.
 Прозоровський М.О.
 Мишка І.І.

Додаток Г

Акт впровадження в учбовий процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор

М.І. Шинкарик

20 р.



АКТ

про впровадження у навчальний процес Тернопільського національного економічного університету (ТНЕУ) результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління Осолінського Олександра Романовича «Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів», що отримані в рамках виконання спільного Українсько-Молдовського науково-дослідного проекту «Дистрибутивні сенсорні мережі з реконфігурацією обчислювальних вузлів» (державний реєстраційний номер 0115U004816).

Ми, комісія у складі: завідувача кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління (ІОСУ), д.т.н., проф., Саченка А.О., керівника курсів «Мікропроцесорні системи» та «Електроніка і електротехніка» к.т.н., професора кафедри ІОСУ, Кочана В.В., та координатора Українсько-американської програми з комп'ютерних наук к.т.н., доцента кафедри ІОСУ, Бикового П.Є., склали цей акт про те, що в навчальному процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій та Навчально-наукового інституту міжнародних економічних відносин ім. Б. Д. Гаврилишина ТНЕУ для студентів напряму підготовки «Комп'ютерні науки» використовуються результати дисертаційної роботи Осолінського О.Р., при викладанні наступних дисциплін:

1. «Мікропроцесорні системи»
 - система команд мікроконтролера STM8 та процес виконання ним програмного забезпечення;
 - методи дослідження енергоспоживання імпульсних споживачів;
2. «Електроніка і електротехніка»
 - базові елементи КМОН-мікросхем;
 - особливості побудови мікросхем на МОН транзисторах.

Ефект від використання результатів дисертаційної роботи Осолінського О.Р. полягає у підвищенні вивчення студентами сучасних методів проектування апаратного забезпечення, покращенні курсового та дипломного проектування, що в результаті забезпечує підвищення рівня підготовки фахівців з напряму «Комп'ютерні науки».

Завідувач кафедри
інформаційно-обчислювальних
систем і управління, д.т.н., професор

Саченко А.О.

Керівник курсів «Мікропроцесорні системи» та
«Електроніка і електротехніка»,
к.т.н., професор кафедри ІОСУ

Кочан В.В.

Координатор Українсько-американської програми
з комп'ютерних наук,
к.т.н., доцент кафедри ІОСУ

Биковий П.Є.

Додаток Д

Акт впровадження в науково-дослідній роботі



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
економічного університету
Задорожний З.М.В.

« _____ » 20__ р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Осолінського Олександра Романовича «Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів» у науково-дослідній роботі на тему:

“Дистрибутивні сенсорні мережі з реконфігурацією обчислювальних вузлів” (державний реєстраційний номер 0115U004816).

Ми, комісія у складі директора Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем к.т.н., професора Кочана В.В., наукового керівника науково-дослідної роботи д.т.н. професора, Саченка А.О. та в.о. директора Науково-дослідного інституту інноваційного розвитку та державотворення Письменного В.І., що створена для приймання роботи, виконаної в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт ТНЕУ на тему «Дистрибутивні сенсорні мережі з реконфігурацією обчислювальних вузлів» (державний реєстраційний номер 0115U004816), встановила:

1. Запропонований Осолінським О.Р. метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів забезпечує штатний режим роботи мікроконтролера та високу точність вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролера за рахунок живлення схеми від стабілізатора струму з можливістю налаштування і використання методу двохтактного інтегрування,

2. Розроблений Осолінським О.Р. метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів, особливістю якого є автоматизація налаштування відхилень миттєвих значень напруги, допусків зміни напруги на мікроконтролері шляхом ітераційної узгодженої зміни ємності конденсатора в колі живлення мікроконтролера, а також відповідному виборі елементів кола живлення і тактової частоти дозволяє обчислювати результати вимірювання енергоспоживання (без методичної похибки) за результатами показників прецизійних амперметра і вольтметра постійного струму, що забезпечує підвищення точності вимірювань та автоматизацію процесу.

Директор НДІ інтелектуальних
комп'ютерних систем
к.т.н., професор

Кочан В.В.

Науковий керівник
науково-дослідної роботи
д.т.н., професор

Саченко А.О.

в.о. директора НДІ
інноваційного розвитку та державотворення

Письменний В.І.

Додаток Е

Патент України № 110142

