



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **110142** (13) **C2**
(51) МПК (2015.01)
G01R 11/00
G01R 21/00
G05F 5/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2014 03292</p> <p>(22) Дата подання заявки: 31.03.2014</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 25.11.2015</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 12.10.2015, Бюл.№ 19</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.11.2015, Бюл.№ 22</p>	<p>(72) Винахідник(и): Осолінський Олександр Романович (UA), Кочан Володимир Володимирович (UA), Домбровський Збишек Іванович (UA), Кочан Орест Володимирович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Осолінський Олександр Романович, вул. Просвіти, 6, м. Тернопіль, 46009 (UA), Кочан Володимир Володимирович, вул. Львівська, 7, кв. 3, м. Тернопіль, 46020 (UA), Домбровський Збишек Іванович, вул. Лучаківського, 3, кв. 34, м. Тернопіль, 46023 (UA), Кочан Орест Володимирович, вул. Львівська, 7, кв. 3, м. Тернопіль, 46020 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 90922 C2, 10.06.2010 Borovy A. Analysis of Circuits for Measurement of Energy of Processing Units/A. Borovy, V. Kochan, A. Sachenko, etc/IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 6-8 September 2007, Dortmund, Germany. - 2007. - Р. 42-46 Боровий А. Стенд дослідження миттєвого значення струму споживання мікропроцесора/ Боровий А., Кочан В., Турченко В. //Вісник ТДТУ. - 2009. - Том 14. - №1. - С.131-138 SU 1224799 A, 15.04.1986 SU 1767652 A1, 07.10.1992 GB 2301903 A, 18.12.1996 UA 53596 C2, 15.08.2006 CN 101672872 A, 17.03.2010, реферат</p>
---	--

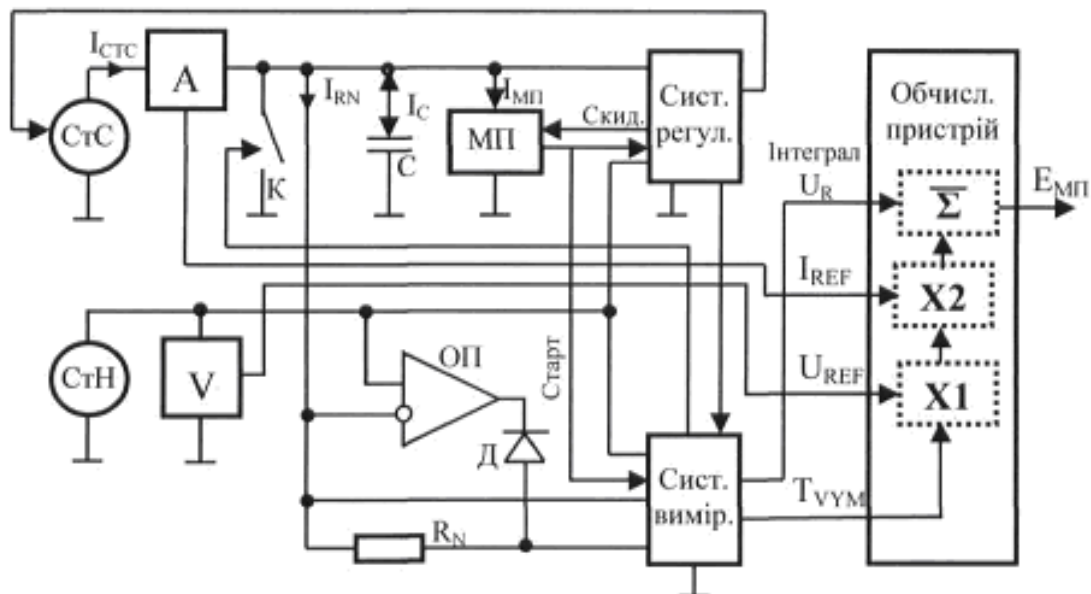
(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ІМПУЛЬСНОГО СПОЖИВАЧА ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

(57) Реферат:

Спосіб визначення енергії виконання команд і програм, зокрема, мікропроцесором. Перед вимірюванням налаштовують струм стабілізатора струму, щоби інтеграл зміни напруги на споживачі за час вимірювання прямував до нуля. Потім вимірюють інтеграл за час вимірювання квадрата спаду напруги на резисторі, ввімкненому послідовно до еквівалента стабілітрона. Далі

UA 110142 C2

вимірюють струм стабілізатора струму та напругу опорного стабілізатора напруги. Середню енергію імпульсного споживача обчислюють як різницю між добутком напруги опорного стабілізатора напруги на струм стабілізатора струму та на час вимірювання і вимірним інтегралом квадрата спаду напруги. Пристрій складається зі стабілізатора струму живлення споживача, паралельно ввімкненого конденсатора (перетворювач струм-напруга) і еквівалента стабілітрона на операційному підсилювачі та діоді. В пристрій введено систему керування, вимірну систему, ключ, пристрій обчислення середньої енергії імпульсного споживача, що складається із послідовно з'єднаних першого блока множення, блока віднімання та другого блока множення, а також прецизійні амперметр і вольтметр постійного струму.



Запропонований спосіб належить до засобів вимірювальної техніки, зокрема засобів вимірювання енергії тих споживачів, які споживають електричну енергію дуже нерівномірно в часі - інтегральних мікросхем, мікропроцесорів, мікроконтролерів та їм подібних мікроелектронних пристроїв.

5 Як відомо [1], імпульсна енергія визначається згідно з математичною формулою

$$E = \int_{t=0}^T u \cdot i \cdot dt, (1)$$

де u - миттєве значення напруги на контактах споживача; i - миттєве значення струму через контакти споживача; t - поточне значення часу; T - час, за який вимірюють енергію.

10 Задача вимірювання потужності та енергії імпульсних споживачів виникає, наприклад, при вимірюванні енергії спрацювання інтегральних мікросхем, особливо, виконаних на базі комплементарної метал-оксид-напівпровідник технології (КМОН), яка (а також її модифікації) останнім часом стали домінувати. Основною особливістю схем КМОН в порівнянні з біполярними технологіями є дуже мале енергоспоживання в статичному режимі. В більшості випадків можна вважати, що енергія споживається тільки під час перемикання станів [2]. Це зумовлює імпульсний характер споживання мікросхем на базі КМОН технології - перепади від споживання у статичному режимі та при перемиканні досягають 1: 200, що значно ускладнює вимірювання енергії споживання таких схем.

15 Відомий спосіб вимірювання енергії, яку споживає деякий пристрій, шляхом вимірювання струму споживача та напруги на ньому [1] з допомогою амперметра і вольтметра, а також часу споживання годинником (секундоміром, наприклад, електронним). Такий спосіб часто використовують для вимірювання середньої потужності на постійному струмі та низьких частотах.

Недоліком такого способу є те, що він не пристосований до забезпечення нормального (штатного) режиму роботи мікроелектронних пристроїв.

25 Дуже широко розповсюджені засоби вимірювання середньої енергії в побуті - лічильники електричної енергії [3], що суміщають в одному пристрої вимірювання струму, напруги та часу. Але електромеханічні лічильники принципово не дозволяють вимірювати потужність мікроелектронних пристроїв через малу чутливість. Сучасні електронні лічильники теж не дозволяють вимірювати середню потужність мікроелектронних пристроїв з високою точністю через те, що їх структурні схеми орієнтовані на вимірювання відносно великих потужностей на низьких частотах і не реагують на високочастотні гармоніки, характерні для мікроелектронних пристроїв - високочастотні складові вхідних сигналів фільтруються як завади.

Відома схема перетворювача струму в напругу на базі операційного підсилювача [4]. Перевагою цієї схеми є дуже малий еквівалентний опір, який вона вносить у вимірювальне коло. 35 Для вимірювання миттєвого струму споживання мікросхем її вхід можна ввікнути між виводом "мінус" мікросхеми і спільним провідником живлення (землею) [4]. Тоді, при відповідній смузі пропускання операційного підсилювача, миттєва напруга на його виході відповідає добутку вхідного струму на опір резистора зворотного зв'язку. Тому, теоретично схема перетворювача струму в напругу забезпечує дуже високу точність і мало впливає на роботу мікросхеми. Однак 40 на практиці, імпульсний характер споживаного мікросхемою струму веде, по-перше, до значної похибки через обмежену швидкість реакції операційного підсилювача на скачок струму на вході, та, по-друге, до збоїв мікропроцесорів через значний динамічний еквівалентний опір входу схеми, викликаний згаданою обмеженою швидкістю реакції операційного підсилювача на скачок струму.

45 Відома схема вимірювання енергії виконання команд мікропроцесором на базі "струмового дзеркала" [4]. З точки зору живлення мікропроцесора, ця схема є еквівалентом шунта, виконаного на нелінійних елементах (р-п переходах транзисторів), який, незважаючи на значний спад напруги (на кожному р-п переході кремнієвого транзистора спад напруги досягає 0,7 В), має малий динамічний опір. Тому його присутність між конденсатором по живленню і мікропроцесором є прийнятна для багатьох типів мікропроцесорів, він не сильно спотворює напругу живлення. Додатковою перевагою такої схеми є те, що резистор, на якому створює вимірюваний спад напруги "віддзеркалений" струм споживання мікропроцесора, одним кінцем приєднаний до землі. Це дозволяє з'єднати землі вимірювальної схеми, схеми з досліджуваним мікропроцесором і цифрового осцилографа, що різко зменшує рівень завад, особливо 55 високочастотних. Однак спад напруги на р-п переходах транзисторів "струмового дзеркала" при значних змінах струму споживання мікропроцесора міняється досить сильно - до 0,15-0,2 В на кожному переході, що в сумі дає зміну напруги живлення на 0,3-0,4 В [4]. При напрузі живлення ядра сучасних мікропроцесорів і мікроконтролерів 2,7...3,3 В зміна перевищує 10 %, що суттєво

впливає на характер енергоспоживання та, при виконанні енергоємних команд, веде до збоїв. Тому, хоча зміну спожитої енергії через зміни напруги живлення можна врахувати, вимірюючи дійсні миттєві значення поточної напруги живлення мікропроцесора другим каналом цифрового осцилографа, зміну режиму його роботи цим шляхом врахувати не вдається.

- 5 Одним з найкращих є спосіб оцінки струму споживання від джерела (стабілізатора) струму по зображенню на екрані осцилографа змін напруги на конденсаторі фільтра шляхом обчислення цього струму за формулою [5]

$$I_C = \frac{U_C \cdot C}{T}, (2)$$

де I_C - струм заряду або розряду конденсатора; U_C - зміна напруги при заряді або розряді

- 10 конденсатора; T - час заряду або розряду конденсатора; C - ємність конденсатора.

Якщо за осцилограмою або за результатами вимірювання, записаними в пам'яті цифрового осцилографа, визначити параметри спаду напруги на конденсаторі фільтра стабілізатора струму, то за формулою (2) можна оцінити струм, споживаний від стабілізатора струму. Такий спосіб годиться і для вимірювання енергії виконання команд мікропроцесором - адже

- 15 мікропроцесор працює в штатному режимі - він заземлений та в колі живлення є конденсатор.

Слід відзначити, що така оцінка є приблизною, бо розряд конденсатора в умовах постійного опору навантаження відбувається по експоненті, а не по прямій. Однак, при дослідженні малих змін напруги (порівняно із напругою живлення), похибка апроксимації експоненти прямою є малою.

- 20 Прототипом пропонованого способу є спосіб, який реалізує пристрій вимірювання миттєвої потужності та енергії виконання команд та інструкцій мікропроцесором [6], де мікропроцесор (або інший імпульсний споживач) живиться від джерела струму - тоді можна обчислювати струми у схемі за першим законом Кірхгофа. В цьому пристрої мікропроцесор працює у нормальному (штатному) режимі - він заземлений, паралельно до його живлення підключено
- 25 конденсатор. Напруга на конденсаторі обмежена еквівалентом стабілітрона, виконаним на операційному підсилювачі та напівпровідниковому діоді. Напругу спрацювання еквівалента стабілітрона задає опорне джерело напруги (прецизійний стабілізатор напруги), вихідна напруга якого рівна номінальній напрузі роботи досліджуваного мікропроцесора (або іншого мікроелектронного пристрою). Напруга живлення досліджуваного мікропроцесора не може
- 30 перевищити задану опорним джерелом напруги - спрацює еквівалент стабілітрона і приймає на себе надлишковий струм, що надходить від стабілізатора струму. Послідовно з еквівалентом стабілітрона ввімкнено прецизійний резистор, за спадом напруги на якому можна виміряти струм, який забирає еквівалент стабілітрона. Зміни напруги на конденсаторі, ввімкненому в коло живлення мікропроцесора, вимірює перший канал цифрового осцилографа, а спад напруги на
- 35 резисторі, ввімкненому послідовно із еквівалентом стабілітрона - другий канал. Земля цифрового осцилографа підключена до виходу опорного джерела напруги. Це дає змогу працювати цифровому осцилографу у диференційному режимі - напруги, що надходять на його обидва входи, близькі до вихідної напруги опорного джерела напруги. Тому, наприклад, при номінальній напрузі живленні мікропроцесора 5 В, зміни напруги на конденсаторі (при відповідному виборі його ємності) під час вимірювання потужності споживання мікропроцесора не будуть перевищувати 50-100 мВ. В такому випадку 8-розрядний цифровий осцилограф (256 квантів) буде мати чутливість від 200 до 400 мкВ, тобто, по відношенню до напруги живлення мікропроцесора 5 В, від 0,004 % до 0,008 %. Одночасно таке ввімкнення землі цифрового осцилографа не створює значних завад через те, що на виході опорного джерела напруги
- 40 ввімкнено електролітичний конденсатор значної ємності (2000-10000 мкФ), тому цифровий осцилограф виявляється заземленим по змінному струму.

- Основним недоліком прототипу є низька завадостійкість щодо завад, наведених зовнішніми електромагнітними полями на вхідні кола цифрового осцилографа. При цьому методи цифрової
- 50 фільтрації для зменшення впливу наведених завад, через дуже велику розбіжність тактової частоти досліджуваного мікропроцесора та частоти завади, мало придатні. Мінімальні тактові частоти досліджуваних сучасних мікропроцесорів складають 10-20 МГц, а основним видом завад є завади від мережі живлення частотою 50 Гц. В такому випадку, для ефективної фільтрації, необхідна вибірка тривалістю 20-50 періодів завади, тобто 1-2,5 секунди. А для дослідження імпульсного споживання мікропроцесора необхідно вловлювати щонайменше
- 55 десятку гармоніку струму споживання, тобто період дискретизації осцилографа повинен складати 5-10 наносекунд. В такому разі необхідна для фільтрації вибірка буде складати від 100 до 500 МБ. Цифрові осцилографи, що мають такі об'єми буферної пам'яті, на сьогодні не

випускаються. Крім того, для оброблення (цифрової фільтрації) вибірки такого об'єму за прийнятний час необхідно використання суперкомп'ютерів.

Задачею винаходу є підвищення точності вимірювання енергії виконання команд мікропроцесором за рахунок підвищення завадостійкості.

5 Додатковою задачею є створення умов для малої похибки співставлення результатів вимірювання миттєвої енергії за допомогою пристрою [6] з результатами вимірювання середньої енергії, виконаними пропонованим технічним рішенням.

Суть пропонованого винаходу полягає в тому, що для вимірювання середньої енергії імпульсного споживача, наприклад мікропроцесора, його живлять від стабілізатора струму, причому конденсатор, ввімкнений паралельно імпульсному споживачу, використовується як перетворювач струм-напруга. Напруга на імпульсному споживачі обмежується за допомогою еквівалента стабілітрона. Спосіб відрізняється тим, що спочатку налаштовують струм стабілізатора струму таким чином, щоби інтеграл відхилення напруги на імпульсному споживачі від початкового значення за час вимірювання (час виконання набору зданої кількості 15 однотипних команд або досліджуваної програми) прямував до нуля (був меншим за допустиме значення). Потім, в наступному циклі вимірювання, вимірюють інтеграл за час вимірювання квадрата спаду напруги на резисторі, ввімкненому послідовно до еквівалента стабілітрона. Далі вимірюють значення струму стабілізатора струму та вихідної напруги опорного стабілізатора напруги за допомогою прецизійних амперметра та вольтметра постійного струму. Для 20 обчислення середньої енергії імпульсного споживача від добутку значення напруги опорного стабілізатора напруги (визначеного прецизійним вольтметром постійного струму) на значення струму стабілізатора струму (визначеного прецизійним амперметром постійного струму) та на значення часу вимірювання (визначеного прецизійним електронним таймером) віднімають значення вимірюваного інтегралу квадрата спаду напруги на резисторі, ввімкненому послідовно до 25 еквівалента стабілітрона.

Пропонований спосіб реалізується пристроєм, що складається із стабілізатора струму живлення імпульсного споживача, підключеного паралельно до імпульсного споживача конденсатора, опорного стабілізатора напруги, вихідна напруга якого рівна номінальній напрузі живлення імпульсного споживача, та високочастотного еквівалента стабілітрона на базі операційного підсилювача та діода. Пристрій відрізняється тим, що в схему введено систему керування, вимірювальну систему, ключ, пристрій обчислення середньої енергії імпульсного споживача, що складається із послідовно з'єднаних першого та другого блоків множення та блока віднімання, а також прецизійні амперметр і вольтметр постійного струму. При цьому 30 входи системи керування підключено до виходів стабілізаторів напруги і струму, а вихід - до керуючого входу стабілізатора струму. Вхід опорної напруги вимірювальної системи підключено до виходу опорного стабілізатора напруги, а вимірювальні входи - до обох кінців прецизійного резистора, ввімкненого послідовно з високочастотним еквівалентом стабілітрона. Виходи вимірювальної системи підключено до керуючого входу ключа закорочення конденсатора та входу пристрою віднімання. При цьому до входів першого та другого блоків множення пристрою 40 обчислення середньої енергії імпульсного споживача підключено виходи прецизійних вольтметра та амперметра відповідно, а до другого входу першого блока множення - вихід лічильника часу вимірювання вимірювальної системи.

Основна ідея запропонованого методу полягає в тому, що, якщо жити досліджуваний імпульсний споживач (мікропроцесор) від регульованого джерела струму, то можна так встановити струм джерела, що сумарні відхилення напруги живлення споживача від номінальної за час дослідження будуть рівні нулю. Відповідним підбором ємності конденсатора в колі живлення споживача можна добитися, що максимальні відхилення його напруги живлення будуть відносно малі (не більше 0,5-1 %). Тоді можна спростити схему вимірювання середньої енергії та використати для її побудови метод двохтактного інтегрування - один з найточніших 50 методів аналого-цифрового перетворення.

Як відзначалося в [6], живлення імпульсного споживача від джерела струму дає змогу записати, згідно з першим законом Кірхгофа, суму струмів у вузлі, куди приєднані стабілізатор струму, споживач, конденсатор, ввімкнений послідовно з еквівалентом стабілітрона резистор, інвертуючий вхід операційного підсилювача і входи систем керування і вимірювання. При вимірюванні середнього енергоспоживання доцільніше записати баланс генерованої та спожитої енергії

$$E_{REFI} = E_{MP} + E_C + E_R + E_{IN} + E_{CS} + E_{MS}, \quad (3)$$

де E_{REFI} - енергія стабілізатора струму (генерована, надходить у вузол); E_{MP} - енергія імпульсного споживача, мікропроцесора (спожита, виходить з вузла); E_C - енергія конденсатора

(спожита, виходить з вузла, коли напруга на конденсаторі росте і повернута, надходить у вузол, коли напруга на конденсаторі падає); E_R - енергія, відведена через резистор (спожита, виходить з вузла); E_{IN} , E_{CS} , E_{MS} - енергії, спжиті входами операційного підсилювача, керуючої системи та вимірювальної системи (ці енергії малі порівняно з іншими, ними можна знехтувати).

5 Енергію, накопичену конденсатором, можна визначити як [5]

$$E_C = (C \cdot U_C^2) / 2, (4)$$

а її зміну - як

$$\Delta E_C = (C \cdot \Delta U_C^2) / 2, (5)$$

10 де E_C , ΔE_C - енергія, накопичена конденсатором, та її зміна; U_C , ΔU_C - напруга на конденсаторі та її зміна.

Якщо виконати першу операцію пропонованого способу (налаштовують струм стабілізатора струму таким чином, щоби інтеграл відхилення напруги на імпульсному споживачі від початкового значення за час вимірювання прямував до нуля), тобто $\Delta U_C \rightarrow 0$, то і зміна

15 енергії, накопиченої конденсатором, буде прямувати до нуля, тобто $\Delta E_C \rightarrow 0$. Таким чином, конденсатор, створюючи штатні умови роботи імпульсного споживача, не змінює баланс енергії генерування-споживання, тобто його енергію можна виключити з (3) і переписати (3) як

$$E_{MP} = E_{REFI} - E_R, (6)$$

В свою чергу енергія джерела струму E_{REFI} не залежить від енергії споживання імпульсного споживача. Вона може бути визначена як

$$E_{REFI} = U_{REF} \cdot I_{REFI} \cdot T_{VYM}, (7)$$

В періоди малого споживання енергії імпульсним споживачем (мікроконтролер виконує набір команд, кожна з яких вимагає відносно мало енергії) напруга на конденсаторі, ввімкненому паралельно імпульсному споживачу, може зростати вище допустимої для цього споживача. Тоді еквівалент стабілітрона спрацьовує та "відводить" надлишковий струм з вузла живлення імпульсного споживача. Ця "відведена" надлишкова енергія може бути врахована, якщо контролювати струм через еквівалент стабілітрона. Для цього послідовно з еквівалентом стабілітрона ввімкнуто резистор (шунт), спад напруги на якому вимірюється вимірювальною системою. Через те, що струм через еквівалент стабілітрона протікає не постійно, а тільки коли напруга на імпульсному споживачі перевищує допустиму, необхідно інтегрувати цю енергію за час вимірювання енергоспоживання. Таким чином, можна записати

$$E_R = \int_{t=0}^T u_{MP} \cdot i_R \cdot dt = \int_{t=0}^T u_{MP} \frac{U_R}{R} dt, (8)$$

де u_{MP} , i_R - поточні значення напруги на імпульсному споживачі та струму через резистор (шунт) відповідно.

35 Слід відзначити, що в данім випадку $u_{MP} = U_{REF} \pm u_R$, але зважаючи на те, що $U_{REF} \gg u_R$, можна записати $u_{MP} = U_{REF}$, а (8) можна переписати як

$$E_R \approx \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R \cdot dt. (9)$$

Відповідно (6) можна переписати як

$$E_{MP} = U_{REF} \cdot I_{REFI} \cdot T_{VYM} - \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R \cdot dt. (10)$$

40 Відповідно до (10) енергію, яку споживає імпульсний споживач, можна визначити знаючи напругу U_{REF} опорного джерела (її можна виміряти прецизійним цифровим вольтметром постійного струму), струм I_{REF} стабілізатора струму (його можна виміряти прецизійним цифровим амперметром постійного струму), час T проведення вимірювання (його можна виміряти цифровим лічильником, на який надходять імпульси кварцового генератора з вимірюною прецизійним частотоміром частотою), опір R резистора, ввімкненого послідовно з

еквівалентом стабілітрона (його можна виміряти прецизійним цифровим омметром постійного струму) 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 доцільно використати метод двохтактного інтегрування - один з найточніших та найбільш завадостійких методів аналого-цифрового перетворення [7].

Для забезпечення високої точності та завадостійкості вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R слід виконати наступні вимоги:

1) час T вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R не повинен бути меншим деякого значення, згідно з яким розраховано елементи вимірювальної системи;

2) час T вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R (тривалість першого такту при використанні аналого-цифрового перетворювача двохтактного інтегрування) повинен бути кратним заваді від мережі живлення, для чого, при вимірюванні енергії виконання команд мікропроцесором, необхідно синхронізувати час запуску виконання програми та кінця вимірювання з однойменними переходами напруги мережі живлення через нуль;

3) в процесі вимірювання необхідно вести підрахунок кількості циклів виконання команди досліджуваного мікропроцесором для того, щоби можна було визначити енергію її виконання як частку від ділення обчисленої згідно з (7) енергією E_{MP} на кількість циклів виконання команди.

Пропонований спосіб реалізує пристрій, структурно-принципова схема якого представлена на кресленні. Вона складається з досліджуваного мікропроцесора (далі МП), що живиться від стабілізатора струму СтС. В коло живлення СтС ввімкнено прецизійний амперметр постійного струму A , конденсатор C , ключ K та еквівалент стабілітрона на базі операційного підсилювача ОП та діода D . В схему також введено опорний стабілізатор напруги СтН, прецизійний вольтметр постійного струму V , резистор R , ввімкнений послідовно з еквівалентом стабілітрона, а також систему регулювання, систему вимірювання та обчислювальний пристрій. Останній складається із пристрою віднімання Σ та перемножувачів $X1$ та $X2$.

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

МП спочатку виконує налаштування своїх вузлів (встановлює потрібні при даних дослідженні режими їх роботи). Перед початком виконання саме досліджуваної команди (програми), МП посилає вимірювальній системі та системі керування код старту дослідження. Система регулювання починає інтегрувати відхилення напруги живлення МП від напруги СтН (остання рівна номінальній напрузі живлення МП). Після виконання перелічених вище трьох умов система регулювання відключає свій вхід від напруги живлення МП та вимірює відхилення інтегралу відхилення напруги живлення МП від напруги СтН. Якщо відхилення напруги живлення МП від номінальної не рівне нулю (перевищує допустиме значення), то система регулювання змінює струм СтС так, щоби наблизити зміну напруги в колі живлення МП за час виконання вимірювання до нуля. Тоді система регулювання скидає МП і описаний процес дослідження повторюється. За декілька ітерацій відхилення напруги живлення МП від номінальної стане близьким до нуля (не буде перевищувати допустиме значення). Тоді система регулювання фіксує значення струму СтС, дає дозвіл виконання вимірювань вимірювальній системі та знову скидає МП.

Система вимірювання, після надходження стартового сигналу з МП, починає інтегрування спаду напруги на резисторі R . Після кінця вимірювання (виконання перелічених вище трьох умов) система регулювання перевіряє відхилення інтегралу відхилення напруги живлення МП від напруги СтН. Якщо відхилення напруги живлення МП від номінальної не рівне нулю (перевищує допустиме значення), то система регулювання не закінчує процес дослідження, а проводить наступне наближення струму СтС до потрібного значення (щоби інтеграл відхилення напруги живлення МП від напруги СтН наближався до нуля). Якщо інтеграл відхилення напруги живлення МП від номінальної близький до нуля (не перевищує допустиме значення), то система регулювання закінчує процес дослідження та ініціює обчислення обчислювальним пристроєм середнього значення енергії виконання команди (або програми) МП згідно з (10). Для цього обчислювальний пристрій замикає ключ K , запам'ятовує дійсне значення струму СтС, виміряне амперметром A та дійсне значення напруги, виміряне вольтметром V . На основі цих значень, а

також значення часу вимірювання (може надходити від системи вимірювання або регулювання) перемножувачі та пристрій віднімання обчислюють згідно з (10) значенням середньої енергії $E_{\text{МП}}$, спожитої мікропроцесором МП за час вимірювання. Запропонований метод вимірювання середньої енергії імпульсних споживачів має методичну похибку, пов'язану з припущенням:

5 коли після виконання операції налаштування $\int_0^T (U_i - U_{\text{REF}}) dt \rightarrow 0$, то можна вважати, що

$$\int_0^T u_i \cdot i_i \cdot dt = U_{\text{REF}} \cdot I_{\text{REFI}} \cdot T_{\text{ВМ}}.$$

Остання рівність безумовно має місце, коли імпульсний споживач лінійний, а закон розподілу відхилень напруги на імпульсному споживачі, ввімкненому згідно з пропонуваним методом, рівномірний. Однак, напівпровідникові елементи, з яких складається мікропроцесор, є нелінійними елементами, в зв'язку з чим і виникає згадана методична похибка.

10 Однак її значення буде досить малим - ємність конденсатора С вибирають таким чином, щоби зміни напруги на досліджуваному імпульсному споживачі під час вимірювання не перевищували $\pm 1\%$, а значить методична похибка при виконанні однієї команди буде значно менша за $\pm 1\%$. При нелінійності енергоспоживання імпульсного споживача $\pm 8\%$, що приблизно відповідає нелінійності споживання мікропроцесорів, методична похибка буде не перевищувати $\pm 8\%$ від $\pm 1\%$, тобто $\pm 0,08\%$. Однак треба відзначити, що приведені значення нелінійності споживання мікропроцесорів стосується відносно великих змін напруги на мікропроцесорі, що відповідають $\pm 10\%$, а при змінах цієї напруги $\pm 1\%$ нелінійність буде значно меншою - при параболічній залежності споживання мікропроцесорів від напруги методична похибка зменшиться до приблизно $\pm 0,015\%$.

20 Крім того виникає методична похибка, пов'язана з приблизним характером рівності (9), за участю якої виведено рівняння вимірювання (10). Було вказано, що $U_{\text{REF}} \gg u_R$, але треба

врахувати також, що у (10) $U_{\text{REF}} \cdot I_{\text{REFI}} \cdot T_{\text{ВМ}} \gg \frac{U_{\text{REF}}}{R} \int_{t=0}^T u_R \cdot dt$, тобто ця методична похибка є

величиною другого порядку малості.

25 Таким чином, запропонований спосіб вимірювання середньої енергії імпульсних споживачів має високу точність (основний член рівняння вимірювання (10) спирається на результати вимірювання на постійному струмі за допомогою прецизійних амперметра і вольтметра), є достатньо простим і не вимагає унікального обладнання - використовувані прецизійні амперметр і вольтметр повинні мати максимальну похибку $0,05 \dots 0,1\%$, а такі прилади широко випускаються багатьма фірмами. Перевагою пропонованого пристрою є те, що його структура та елементи у великій мірі співпадають з прототипом - пристроєм вимірювання миттєвої потужності споживання імпульсних споживачів. Зокрема, практично співпадають стабілізатори струму і напруги, еквівалент стабілітрона та конденсатор в колі живлення імпульсного споживача. Це дає змогу дуже точного порівняння енергії виконання команд, виміряних прототипом і пропонованим пристроєм, адже тоді перелічені елементи будуть приймати участь при вимірюваннях обох видів енергії, тому їх похибки при порівнянні будуть взаємно знищуватися.

30 Запропонований спосіб і пристрій вимірювання середньої енергії імпульсних споживачів може знайти застосування для оцінки енергії спрацювання інтегральних мікросхем, мікропроцесорів і мікроконтролерів. Він може бути використаний для оцінки енергії виконання окремих команд мікропроцесорами та мікроконтролерами, що дозволить оптимізувати їх програмне забезпечення і знизити споживання енергії, продовживши тим самим час автономної роботи (при живленні від акумуляторів або батарей). Першим кроком на шляху такої оптимізації є створення бази даних про споживання окремих команд, що можна виконати на основі результатів дослідження мікропроцесорів і мікроконтролерів з допомогою запропонованого пристрою. Крім того, такий шлях зменшення енергоспоживання найбільш універсальний, він може бути використаний як для створення нових систем, так і для модернізації існуючих.

Джерела інформації:

1. Електричні вимірювання електричних та неелектричних величин / Під ред. Є.С.Поліщука.- К.:Вища школа, 1978.-352с.

50 2. <http://en.wikipedia.org/wiki/CMOS>

3. SA2002D Single phase kWh metering 1C for mechanical display applications.

4. A.Borovyi, V.Kochan, A.Sachenko, V.Konstantakos, V.Yaskilka. Analysis of Circuits for Measurement of Energy of Processing Units. IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems-IDAACS'07, Dortmund, Germany, 2007.

5. <http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>

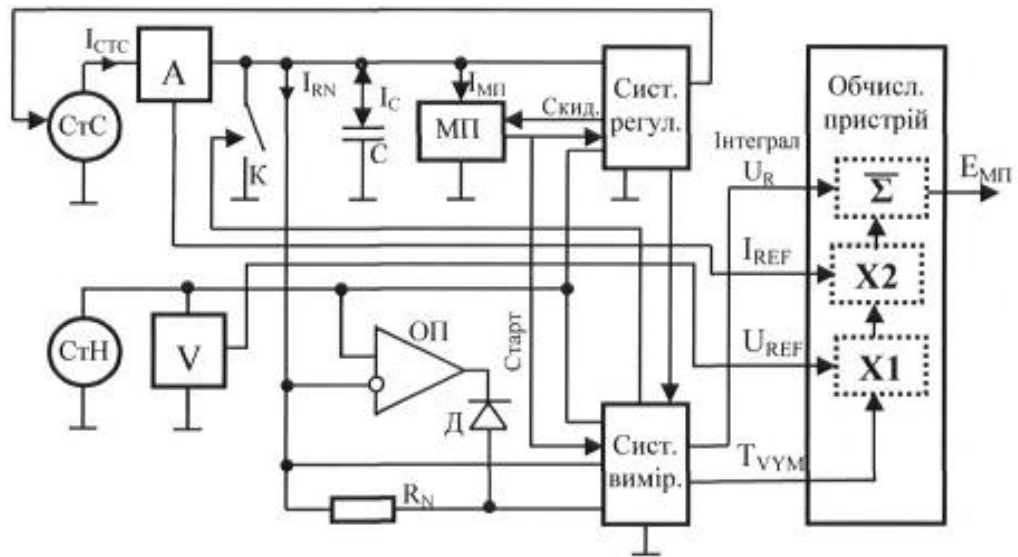
6. Патент 90922 України, МПК7 G05F 5/00, GO IK 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів [Текст] / Боровий А. М., Майків І. М., Кочан Р. В., Домбровський З.І., Кочан В. В.; заявник і патентовласник Боровий А. М., Майків І. М., Кочан Р. В., Домбровський З.І., Кочан В. В. - № а2008 06325; заявл. 13.05.08; опубл. 10.06.10, Бюл. №11.- 4 с.: іл.

7. Орнатский ПП. Автоматические измерения и приборы. / Орнатский ПП. - К.: Выща школа, 1986,-504 с. (5-е изд., пераб. и доп.)

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача, що полягає у живленні його від стабілізатора струму, використанні конденсатора, ввімкненого паралельно імпульсному споживачу, як перетворювача струм-напруга та обмеженні напруги на імпульсному споживачі за допомогою еквівалента стабілітрона, який **відрізняється** тим, що спочатку налаштовують струм стабілізатора струму таким чином, щоби інтеграл відхилення напруги на імпульсному споживачі від початкового значення за час вимірювання прямував до нуля та був меншим за допустиме значення, потім вимірюють інтеграл за час вимірювання квадрата спаду напруги на резисторі, який вмикають послідовно до еквівалента стабілітрона, далі вимірюють значення струму стабілізатора струму та вихідної напруги опорного стабілізатора напруги за допомогою прецизійних амперметра та вольтметра постійного струму, а для обчислення середньої енергії імпульсного споживача від добутку значення напруги опорного стабілізатора напруги на значення струму стабілізатора струму та на значення часу вимірювання віднімають значення виміряного інтегралу квадрата спаду напруги на резисторі, ввімкненому послідовно до еквівалента стабілітрона.

2. Пристрій вимірювання середньої енергії імпульсного споживача, що складається із стабілізатора струму живлення імпульсного споживача, підключеного паралельно до імпульсного споживача конденсатора, опорного стабілізатора напруги, вихідна напруга якого рівна номінальній напрузі живлення імпульсного споживача, та високочастотного еквівалента стабілітрона на базі операційного підсилювача та діода, який **відрізняється** тим, що в схему введено систему керування, вимірювальну систему, ключ, пристрій обчислення середньої енергії імпульсного споживача, що складається із послідовно з'єднаних першого та другого блоків множення та блока віднімання, а також прецизійні амперметр і вольтметр постійного струму, причому входи системи керування підключено до виходів стабілізаторів напруги і струму, а вихід - до керуючого входу стабілізатора струму, вхід опорної напруги вимірювальної системи підключено до виходу опорного стабілізатора напруги, вимірювальні входи - до обох кінців прецизійного резистора, ввімкненого послідовно з високочастотним еквівалентом стабілітрона, а виходи - до керуючого входу ключа закорочення конденсатора та входу пристрою віднімання, при цьому до входів першого та другого блоків множення підключено виходи прецизійних вольтметра та амперметра відповідно, а до другого входу першого блока множення - вихід лічильника часу вимірювання вимірювальної системи.



Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601