

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-16>

УДК 004

**Олександр ОСОЛІНСЬКИЙ**

Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-0136-395X>  
e-mail: [osolinskiy.oleksandr@gmail.com](mailto:osolinskiy.oleksandr@gmail.com)

**Володимир КОЧАН**

Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-8376-4660>  
[volodymyr.kochan@gmail.com](mailto:volodymyr.kochan@gmail.com)

**Олег САЧЕНКО**

Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-9337-8341>  
e-mail: [olsachenko231@gmail.com](mailto:olsachenko231@gmail.com)

**Павло БИКОВИЙ**

Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-5705-5702>  
[pb@wunu.edu.ua](mailto:pb@wunu.edu.ua)

**Діана ЗАГОРОДНЯ**

Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-9764-3672>  
[dza@wunu.edu.ua](mailto:dza@wunu.edu.ua)

## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА З ПІДВИЩЕНОЮ ЗАВАДОСТІЙКІСТЮ

*Будучи реальним стимулом для конкурентоспроможності та продуктивності для таких секторів, як охорона здоров'я, сільське господарство чи промисловість 4.0, ринок Інтернету речей трансформує бізнес-моделі та революціонує практики. Головним завданням є розробка додатків на базі мікроконтролерів з високим обчислювальним потенціалом з обмеженими ресурсами. Щоб задовольнити вимоги високого рівня продуктивності, так і вимоги до низької потужності, потрібен детальний аналіз як програмної, так і апаратної частини модулів IoT «серцем» яких є мікроконтролер.*

*Гнучким, перспективним і малозатратним є аналіз програмного коду, який завантажується в пам'ять МК. Але досі не отримано універсальної методики та засобів для цього. Все пояснюється тим, що домінуюча технологія виготовлення елементної бази є (КМОП, CMOS). Дана технологія зменшує струм споживання схеми в режимі очікування близько 0, а в момент активації може досягати в 200 разів більше.*

*Частота роботи мікросхеми є в два рази меншою від частоти тактового генератора. Для роботи в таких умовах джерело живлення МК повинно мати малий динамічний внутрішній опір, крім цього відомі системи вимірювання мають слабку стійкість до мережі 220В/50Гц. Дані завади впливають на процес вимірювання енергії виконання ПЗ.*

*Тому в даній роботі запропоновано пристрій з підвищеною завадостійкістю для вимірювання енергоспоживання мікроконтролера в складі IoT модулів.*

*Ключові слова: Енергоспоживання, мікроконтролер, завадостійкість, вбудовані пристрої*

Oleksandr OSOLINSKIY, Volodymyr KOCHAN,  
Oleg SACHENKO, Pavlo BYKOVYY, Diana ZAHORODNIA  
West Ukrainian National University

## DEVICE WITH INCREASED NOISE IMMUNITY FOR MEASURING THE POWER CONSUMPTION BY MICROCONTROLLER

*As a real drive force of competitiveness and productivity for such sectors as healthcare, agriculture or industry 4.0, the IoT market is transforming business models and practices. The main task is developing applications for microcontrollers with high computing potential with limited hard and soft resources. For satisfaction both requirements high performance and low power, needs a detailed analysis of the software and hardware for IoT modules is required, the "heart" of which is the microcontroller.*

*Flexible, promising and low-cost is analysis the program code that into the MCU memory. However, an universal method and resources for this have not yet been obtained.*

*Everything is explained by the fact that the dominant manufacturing element base technology is (CMOS). This technology reduces the current consumption of the circuit in standby mode to about 0, and at the time of activation it can reach 200 times more. The frequency of the IC is two times less than the frequency of the clock generator. For to work under such conditions, the MCU power supply must have a low dynamic internal resistance. Also the known measurement systems have poor noise resistance to a 220V/50Hz network. These interferences affect the measuring process of the software energy execution.*

*Therefore, in this paper proposed a device with increased noise immunity for measuring the power consumption by microcontroller as part of IoT modules.*

*Keywords: Power consumption, microcontroller, noise immunity, embedded devices*

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В даний час майже кожен пристрій у побуті оснащений будь-якою вбудованою електронікою [1, 2]. Ці пристрої мають час роботи, пропорційне ємності батареї, кількості операцій, що виконуються за цикл, і кількості даних, що обмінюються [3]. Останнім часом впроваджуються нові обчислювальні парадигми, оскільки мікропроцесорам приділяється набагато менше уваги з допомогою зв'язку [4]. Проблеми обчислень у сучасних вбудованих системах особливо високі, оскільки мікроконтролер має відповідати певним додатковим вимогам. Зростання вимог до обчислень і пам'яті, підтримка підключення, відповідність конструктивним обмеженням, низька вартість, низьке енергоспоживання і, у деяких випадках, обмеження в реальному часі спонукають дослідників знаходити нові рішення для ефективних апаратних архітектур [5]. Існує компроміс між продуктивністю обробки та енергоспоживанням. Для дослідження енергоспоживання MCU використовуються різні методи та техніки [6] [7], [8] [9]

Основним недоліком пристрою [7] є відносно низька завадостійкість щодо завад, наведених зовнішніми електромагнітними полями на вхідні кола цифрового осцилографа. При цьому методи цифрової фільтрації для зменшення впливу наведених завад, через дуже велику розбіжність тактової частоти досліджуваного МК та частоти завади, мало придатні. Мінімальні тактові частоти досліджуваних сучасних МК 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 МК необхідно вловлювати щонайменше десятку гармоніку струму споживання, тобто період дискретизації осцилографа повинен складати 5-10 наносекунд. В такому разі необхідна для фільтрації вибірка буде складати від 80 до 400 МБ. Цифрові осцилографи, що мають такі об'єми буферної пам'яті, на сьогодні є досить дорогими [10]. Крім цього, цифрова фільтрація вибірки такого об'єму за прийнятний час вимагає використання великих потужностей [11]. Дія завад збиває систему регулювання при її налаштуванні (не дає змоги налаштувати оптимальний струм стабілізатора 60 струму) та впливає на результат вимірювання під час безпосереднього вимірювання енергоспоживання МК.

### Задача вимірювання потужності та енергії МК

Задача вимірювання потужності та енергії МК значно ускладнюється, наприклад при вимірюванні енергії спрацювання інтегральних мікросхем, особливо виконаних на базі комплементарної метал-оксид-напівпровідникової технології (КМОП), яка останнім часом стала домінувати. Для таких мікросхем перепади енергоспоживання у статичному режимі та у момент перемикання досягають 1 до 200 [12] [13]

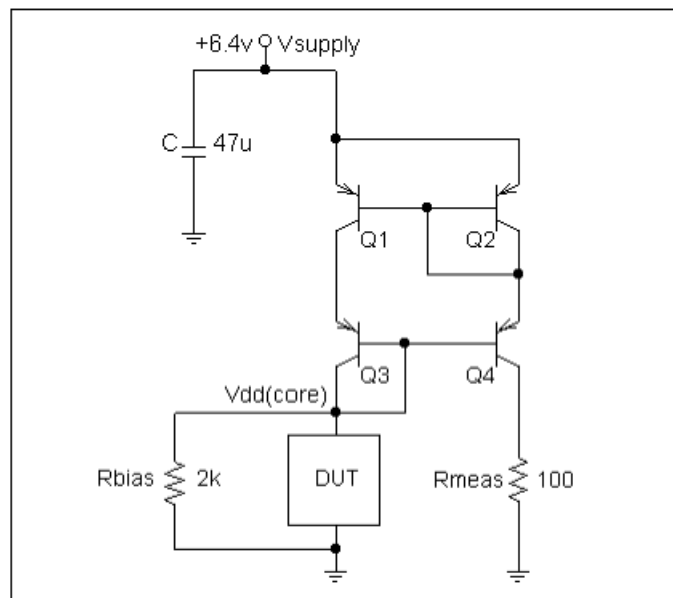


Рис.1. Метод вимірювання за допомогою "струмового дзеркала"

Частота перемикань таких мікросхем (повторення імпульсів споживання енергії) відповідає подвійній частоті тактового генератора (десятки МГц), при цьому гармоніки імпульсів споживання енергії сягають сотень МГц. Тому необхідний малий динамічний внутрішній опір джерела живлення, як активний, так і реактивний, інакше виникають збої. Зменшення динамічний внутрішній опір джерела живлення ввімкненням у коло живлення високочастотного конденсатора, причому довжина провідників від мікросхем до конденсатора повинна бути 20 мінімальною (1...2 см). Цей режим роботи МК можна назвати штатним, його порушення веде до порушення функціонування через збої.

Тому більшу точність вимірювання енергоспоживання МК забезпечує спосіб [14], що включає вимірювання миттєвого струму споживання МК. Цей спосіб, для зменшення динамічного внутрішнього опору (особливо реактивного) кола живлення МК, використовує "струмове дзеркало".

Через нелінійні властивості транзисторів динамічний опір "струмового дзеркала" є малим і МК працює у штатному режимі. Додатковою перевагою способу є те, що використаний як вимірювальний прилад цифровий осцилограф є заземленим. Однак, при значних змінах струму через транзистор, напруги база-емітер транзисторів "струмового дзеркала" змінюються на 0,2...0,3 В. Тобто у сумі спад напруги на "струмовому дзеркалі" змінюється на 0,4...0,6 В. Така зміна напруги веде до методичної похибки, яку неможливо відкоригувати. Побудовані за результатами вимірювання моделі мають похибку приблизно 7 %.

Більш кращими характеристиками відносно завад є пристрій вимірювання середньої енергії імпульсного споживача.

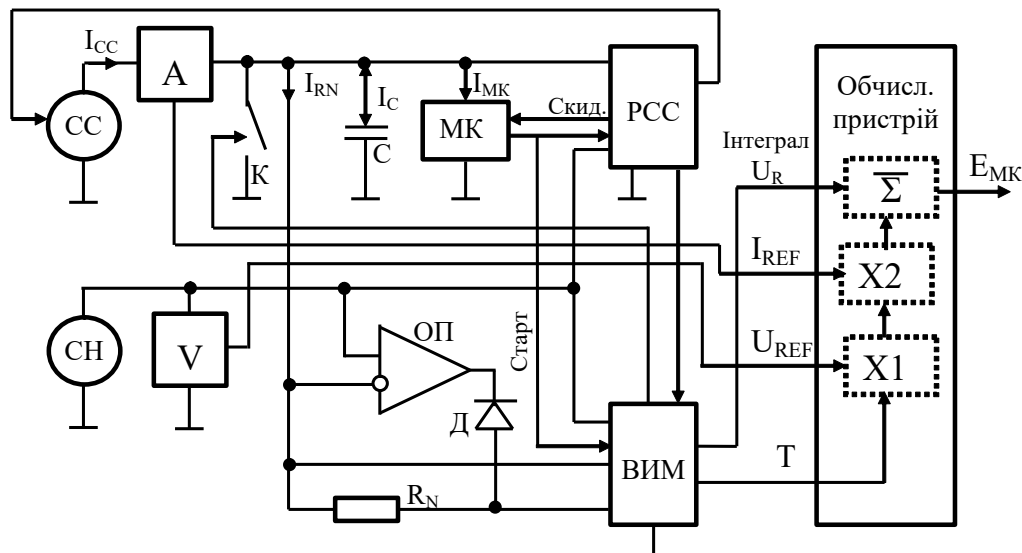


Рис.2. Пристрій вимірювання середньої енергії імпульсного споживача

При реалізації цього пристрою мікроконтролер живлять від стабілізатора струму, конденсатор, ввімкнений паралельно імпульсному споживачу, використовується, як перетворювач струм-напруга, а його ємність можна змінювати. При реалізації способу спочатку налаштовують струм стабілізатора струму таким чином, щоб за час вимірювання (час виконання набору зданої кількості однотипних команд або досліджуваної програми) прямували б до нуля (були меншими за допустиме значення) тіж самі вимоги ставляться до зміни напруги на конденсаторі С в колі живлення МК, так і зміни інтеграла напруги на конденсаторі С в колі живлення МК. Для цього в момент запуску виконання досліджуваного набору інструкцій, ємність конденсатора встановлюють максимальною (настільки великою, що перевищення напруги в колі живлення імпульсного споживача стає неможливим), а під час налаштування струму стабілізатора струму одночасно змінюють ємність конденсатора, ввімкненого паралельно імпульсному споживачу, таким чином, щоби зміни спаду напруги на імпульсному споживачі не перевищували допустимі. Так як дана реалізація має схильність до збоїв при зовнішніх впливах, наприклад робота мережі 220В/50Гц, актуальною є задача забезпечення умов, при яких використовувані інтегруючі засоби вимірювання напруги (аналого-цифрові перетворювачі двотактного інтегрування або сигма-дельта) можуть у повній мірі проявити свої завадостійкі властивості.

### Пристрій з підвищеною завадостійкістю

Пристрій забезпечення завадостійкості вимірювання середньої енергії МК складається із послідовно ввімкнених керованого стабілізатора струму, завадостійкого амперметра постійного струму і МК (Рис.3). Паралельно до МК підключені перші входи двох компараторів, керований магазин ємності та вхід вимірювальної системи, вихід якої підключено до послідовно ввімкнених системи прийняття рішень та блока керування. Шина даних останнього підключена до входів-виходів керування та обміну даними керованого стабілізатора струму, завадостійкого амперметра постійного струму, магазину ємності, вимірювальної системи, системи прийняття рішень, двох цифро-аналогових перетворювачів, виходів двох компараторів та входу двох послідовно з'єднаних примножувачів. Другі входи примножувачів підключені до виходу завадостійкого амперметра постійного струму та підключеного до виходу МК лічильника циклів виконання програми МК. При цьому вихід стабілізатора напруги підключено до входів опорної напруги вимірювальної системи і двох цифро-аналогових перетворювачів, виходи яких підключено до других входів

згаданих двох компараторів. Для підвищення завадостійкості пристрою вимірювання енергії споживання МК, у схему введені дві підсистеми - запуску циклу вимірювання та закінчення циклу вимірювання.

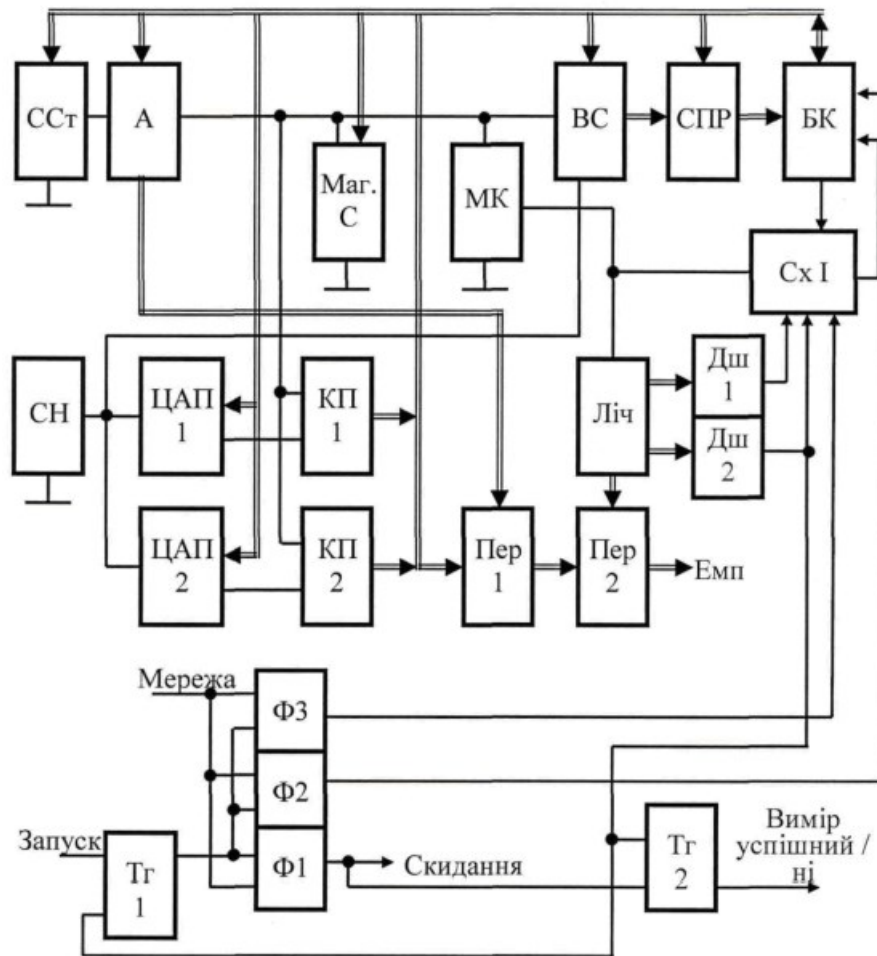


Рис.3. Пристрій забезпечення завадостійкості вимірювання середньої енергії МК

Перша з них складається із двох тригерів та трьох формувачів імпульсів, що спрацьовують при переході мережі живлення (джерела завад) через нуль. При цьому на перший вхід першого тригера надходить сигнал "запуск" процесу вимірювання енергії споживання МК, а його вихід підключено до входів дозволу спрацювання трьох формувачів, до робочих входів яких підключено змінну напругу мережі живлення. Перший з формувачів формує сигнал "скидання" всіх лічильників і тригерів пристрою завадостійкого 30 вимірювання енергії споживання МК. Вихід другого формувача підключено до входу запуску чергового циклу вимірювання енергії споживання МК блока керування, згідно з переходом мережі через нуль. Вихід третього формувача, що формує допустимі межі часу закінчення чергового циклу вимірювання енергії споживання МК, підключено до входу схеми I підсистеми закінчення циклу вимірювання. Вихід схеми I підсистеми закінчення циклу вимірювання підключено до входу блока керування, а інші входи - до виходів блока керування, МК, та двох дешифраторів, входи яких підключено до виходів лічильника циклів виконання програми МК. При цьому вихід другого дешифратора підключено також до других входів двох тригерів підсистеми запуску циклу вимірювання. Завадостійкі властивості даного пристрою проявляються виконанням наступних умов:

1. час вимірювання повинен бути не менший за мінімально допустимий  $T_{MIN}$  та не більший за максимально допустимий  $T_{MAX}$ ;
2. час вимірювання повинен знаходитися у межах заданого допуску від  $-\square TSIN$ , до  $+\square TSIN$  відносно переходу напруги мережі живлення через нуль (при умові початку вимірювання у момент аналогічного переходу мережі живлення через нуль);
3. за час вимірювання досліджуваних інструкції, команди, фрагменту програми або програми у цілому МК повинен виконувати відому цілу кількість разів;
4. за час вимірювання відхилення напруги на конденсаторі (магазині ємності) у колі живлення МК повинно не перевищувати допустимого;

5. за час вимірювання інтеграл відхилення напруги на конденсаторі у колі живлення МК повинен не перевищувати допустимого.

В структуру схеми представленої вище входять також: стабілізатор струму ССт, заводський амперметр А постійного струму, магазин ємності Маг.С, досліджуваний МК, вимірювальна система ВС, система прийняття рішень СПР, блок керування БК, стабілізатор напруги СН, цифро-аналогові 5 перетворювачі ЦАП1 і ЦАП2, компаратори КП1 і КП2, лічильник Ліч та два примножувачі Пер1 і Пер2 (див. Рис.3). Для підвищення заводськості у схему введено дві підсистеми - запуску циклу вимірювання та закінчення циклу вимірювання. Перша з них складається із двох тригерів Тг1 і Тг2, а також трьох формувачів імпульсів Ф1, Ф2, і Ф3.

Друга з них складається із двох дешифраторів Дш1 і Дш2 та схеми І СхІ. 10 Процес вимірювання енергоспоживання досліджуваного МК складається із ряду циклів, при яких проходить налаштування параметрів живлення МК - струму стабілізатора струму ССт, ємності магазину Маг.С, а також допустимих відхилень напруги на досліджуваному МК, які фіксують компаратори КП1 і КП2. Межі спрацювання цих компараторів задають цифро-аналогові перетворювачі ЦАП1 і ЦАП2. У кожному циклі вимірювання МК виконує записану у його пам'ять програму багато разів, цю кількість підраховує лічильник Ліч. При цьому КП1 і КП2 фіксують наявність виходу напруги на МК за заданою межею, а вимірювальна система ВС визначає інтеграл відхилення напруги на МК (у складі ВС це робить інтегруючий аналого-цифровий перетворювач) від заданої напруги стабілізатора напруги СН. Після закінчення циклу вимірювання за їх результатами система прийняття рішень СПР визначає необхідність змін налаштування ССт, Маг.С, КП1, КП2. Якщо зміни налаштувань не слід робити, то процес вимірювання енергоспоживання МК закінчується. Значення спожитої енергії Емп визначається примножувачами Пер1 і Пер2, відповідно до формули

$$\int_{t=0}^T U_i \cdot I_i \cdot dt = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T_{VYM},$$

де  $U_{REF}$ ,  $I_{REF}$  - напруга стабілізатора напруги СН та струм стабілізатора струму ССт, який після закінчення циклу вимірювання вимірює заводський амперметр А постійного струму;  $T_{VYM}$  - тривалість циклу вимірювання енергоспоживання досліджуваного МК, який фіксує Ліч.

Зауважимо, що поставлені вимоги підвищення заводськості вимірювання середньої енергії МК забезпечують підсистеми запуску циклу вимірювання та закінчення циклу вимірювання..

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Таким чином запропонований пристрій, при застосуванні удосконалень які були описані вище, має вищу стійкість до завад, які створює мережа живлення. Проведені імітаційні дослідження показали, що, при відхиленні часу вимірювання від періоду мережі не більше, ніж на 0,9 мілісекунди, при тривалості виконання програми 1 мілісекунду, похибка вимірювання середньої енергії споживання МК, викликана завадою амплітудою 60 мВ, не буде перевищувати 0,012 %. Така похибка від дії завад цілком прийнятна навіть для дуже точних вимірювань енергоспоживання МК. Запропонований пристрій може знайти застосування для оцінки енергії спрацювання інтегральних мікросхем, зокрема мікроконтролерів та мікропроцесорів в складі вбудованих систем та IoT модулів. Перевагою вимірювання середнього енергоспоживання є відсутність накопичення похибки, характерної для вимірювання миттєвого енергоспоживання. Пристрій можна використати для оцінки енергії виконання як окремих інструкцій, так і фрагментів програм, а навіть програм в цілому. Це дозволить оптимізувати програмне забезпечення МК щодо споживання енергії, продовживши тим самим час автономної роботи пристроїв.

### References

1. M. Capra, R. Peloso, G. Masera, M. Ruo Roch, and M. Martina, "Edge computing: A survey on the hardware requirements in the internet of things world," *Future Internet*, vol. 11, no. 4, p. 100, 2019.
2. Khriji, D. El Houssaini, I. Kammoun, and O. Kanoun, "Energy efficient techniques in wireless sensor networks," in *Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks: Technologies, Components and System Design*, De Gruyter Oldenbourg, 2018.
3. T. Adegbiya, A. Rogacs, C. Patel, and A. Gordon-Ross, "Microprocessor optimizations for the internet of things: A survey," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 7–20, 2017.
4. L. Catuogno, C. Galdi, and N. Pasquino, "An effective methodology for measuring software resource usage," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 10, pp. 2487–2494, 2018.
5. R. Chéour, S. Khriji, D. El Houssaini, M. Baklouti, M. Abid, and O. Kanoun, "Recent trends of fpga used for low-power wireless sensor network," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 34, no. 10, pp. 28–38, 2019.
6. "Chapter 11: The Current Mirror." Scribbr. <https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-11> (accessed Sep. 11, 2022)
7. Patent No 90922 Ukraine. The device for measuring the energy of impulse consumers, by A. Borovyi. [Online]. Available: <https://base.uipv.org/searchINV/getdocument.php?claimnumber=a200806325&doctype=ou>
8. Patent No 114219 Ukraine.. A method of measuring the average energy of a pulse consumer and a device for its implementation, by O. Osolinskyi, V. Kochan, Z. Dombrovkyi, O. Kochan. [Online]. Available: <https://base.uipv.org/searchINV/getdocument.php?claimnumber=a201506563&doctype=ou>

- 
9. “ESP32 Board Power Consumption.” Scribbr. <https://therandomwalk.org/wp/esp32-power-consumption/> (accessed Sep. 11, 2022)
10. “Digital Oscilloscope DS7054.” Scribbr. <https://rigolshop.eu/product-oscilloscope-mso/ds7000-ds7054.html> (accessed Sep. 11, 2022)
11. “ThingSpeak - IoT Platform with MATLAB Analytics.” Scribbr. [https://indico.cern.ch/event/654636/contributions/2834242/attachments/1636045/2610243/MATLAB\\_IoT\\_public.pdf](https://indico.cern.ch/event/654636/contributions/2834242/attachments/1636045/2610243/MATLAB_IoT_public.pdf) (accessed Sep. 11, 2022)
12. “CMOS Power Consumption.” Scribbr. [https://www.ti.com/lit/an/scaa035b/scaa035b.pdf?ts=1674735033278&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/scaa035b/scaa035b.pdf?ts=1674735033278&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (accessed Sep. 11, 2022)
13. L. Luet Ng, K. Ho Yeap, M. Wan Ching Goh, and V. Dakulagi, “Power Consumption in CMOS Circuits,” Field-Effect Transistor [Working Title], Jun. 2022, doi: 10.5772/intechopen.105717.
14. Analysis of Circuits for Measurement of Energy of Processing Units [Text] / A. Borovyi, V. Konstantakos, V. Kochan [et al.] // Proceedings of the fourth IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems -: IEEE, 2007. - September, 9-11. - P. 42-47. Borovyi, A., Kochan, V., Sachenko, A., Konstantakos, V., & Yaskilka, V. (2007, September).