

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ НА ПЛАТФОРМІ ESP32

Вінницький національний технічний університет

У даній роботі розглянуто питання розробки пристрою керування для активного фільтра на базі мікроконтролера ESP32. Основною метою розробки є ефективна компенсація гармонічних спотворень в електричних мережах, які виникають під впливом нелінійних навантажень. У роботі детально описані схеми сенсорів напруги та струму, які використовуються для моніторингу параметрів мережі, а також їх інтеграція з ESP32 для збору даних.

Сенсори напруги та струму відіграють ключову роль у забезпеченні точності керування фільтром. Їхні схеми включають точні резистивні дільники для вимірювання напруги та датчики Холла для вимірювання струму. В результаті отримання сигналів з цих датчиків генерується аналоговий сигнал, який перетворюється в цифровий за допомогою вбудованого АЦП ESP32. Особлива увага приділяється аналізу діаграм сигналів з сенсорів, які демонструють зміну електричних параметрів у реальному часі. Це забезпечує швидке реагування системи на зміни у навантаженні та ефективне керування активним фільтром.

ESP32 виконує генерацію ШІМ-сигналу, який слугує для управління інвертором активного фільтра гармонік. У роботі розглянуто методи формування ШІМ-сигналів, які забезпечують мінімізацію гармонічних спотворень у мережі. Генерація ШІМ-сигналів відбувається з використанням 16-бітного генератора, що дозволяє досягнути високої точності та плавності керування напругою і струмом за допомогою інвертора. Також наведені особливості налаштування частоти та ширини імпульсів для адаптації до змінних умов експлуатації пристрою керування активним фільтром.

Алгоритм перетворення сигналів з сенсорів базуються на швидкісному зчитуванні аналогових сигналів, їхньому фільтруванні та обробці для формування керуючих дій. Для забезпечення роботи пристрою керування силовим активним фільтром використовується програмний код, що дозволяє системі одночасно зчитувати дані, генерувати керуючий сигнал і контролювати параметри мережі.

Результати даного дослідження можуть бути використані в промислових системах і побутових мережах для покращення якості електричної енергії шляхом активної компенсації гармонічних спотворень.

Ключові слова: силовий активний фільтр, сенсор струму, сенсор напруги, ШІМ сигнал, ESP32.

Вступ

Гармонічні спотворення в електричних мережах є однією з найактуальніших проблем сучасної електроенергетики [1, 2, 3]. Зростаюче використання нелінійних навантажень, таких як імпульсні блоки живлення, інвертори та асинхронні двигуни з частотно керованими приводами, призводить до виникнення гармонік, які негативно впливають на якість електроенергії. Це, у свою чергу, спричиняє підвищені втрати потужності, зниження ефективності роботи електрообладнання та потенційне перевантаження мережі. Для боротьби з цими явищами широко використовуються активні фільтри, які дозволяють ефективно компенсувати небажані гармонічні складові.

Одним із перспективних підходів до реалізації таких фільтрів є використання мікроконтролерів, зокрема ESP32, що поєднує в собі високу продуктивність та здатність до обробки сигналів у реальному часі. ESP32 має вбудовані АЦП, можливість генерування ШІМ-сигналів та підтримує багатозадачне програмування, що робить його ідеальним вибором для створення керованих систем у реальному часі. Застосування ESP32 для побудови активних фільтрів дозволяє створити високоефективну систему з мінімальними витратами, придатну для інтеграції в різноманітні промислові та побутові електроустановки [4, 5, 6, 7].

Метою дослідження є розробка надійної та адаптивної системи, здатної компенсувати гармонічні спотворення в реальному часі і тим самим покращити якість електроенергії в мережах різного призначення.

Результати дослідження

У результаті дослідження було розроблено пристрій керування для активного фільтра на базі мікроконтролера ESP32, який здатний ефективно компенсувати гармонічні спотворення в електричних мережах. Проведені експерименти дозволили оцінити точність та швидкодію системи, а також дослідити її роботу в різних режимах.

На рисунку 1, 2 представлено схему підключення сенсорів напруги та струму до мікроконтролера ESP32. Для вимірювання напруги використовується резистивний дільник, який знижує вхідну напругу до рівня, сумісного з аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) ESP32. Струм вимірюється за допомогою датчика Холла, що забезпечує ізольоване зчитування сигналу струму. Обидва сенсори передають аналогові сигнали на АЦП ESP32, де вони перетворюються на цифрові значення для подальшої обробки.

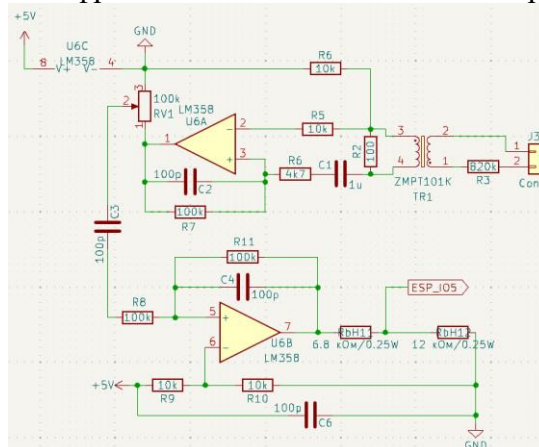


Рис. 1. Принципова схема сенсора змінної напруги на трансформаторі ZMPT101K

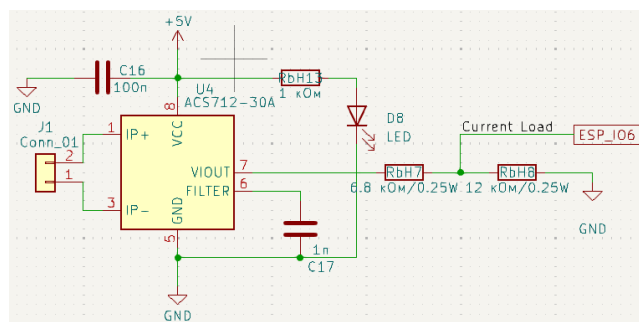


Рис. 2. Принципова схема сенсора струму на мікросхемі ACS712-30A

Для вимірювання сигналів з сенсорів використано осцилограф. Він показує діаграму сигналу напруги та струму, що передається на ESP32 для аналізу. Сигнал напруги (рис. 3, а) є синусоїдним і відображає зміну напруги в електричній мережі. В реальному часі цей сигнал проходить через АЦП, де кожна його точка оцифровується, і результуючі дані використовуються для побудови подальшого керування системою активного фільтра. Сигнал струму (рис. 3, б), зчитується за допомогою датчика Холла. Цей сигнал також є синусоїдним, але його фаза може бути зміщена щодо сигналу напруги в залежності від характеристик навантаження. Сигнал струму необхідний для точного визначення гармонічних спотворень та формування коригуючого впливу на роботу фільтра.

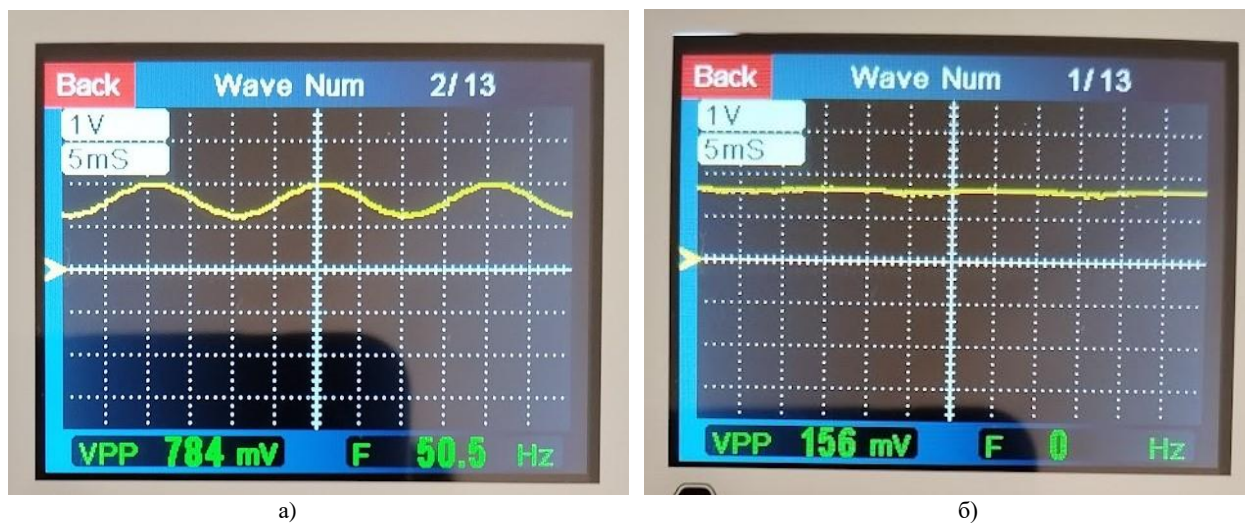


Рис. 3. Діаграма сигналу напруги мережі (а) та спаду напруги для зчитування струму (б)

Для вимірювання постійної напруги, використано ізольований операційний підсилювач AMC1200 (рис. 4), який ввімкнений через резистивний подільник. Цей подільник використовується для зниження вхідної постійної напруги до рівня, який відповідає вхідним характеристикам AMC1200. Сигнал після подільника подається на вхід підсилювача, де він проходить підсилення до рівня напруги ESP32. Даний блок працює від джерела живлення з гальванічною розв'язкою B0503S-1W.

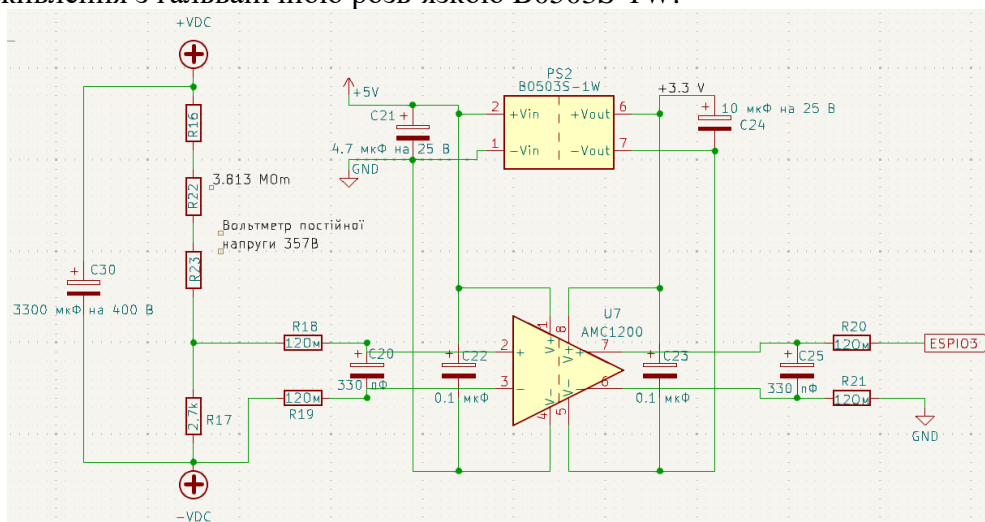


Рис. 4. Принципова схема сенсора постійної напруги на мікросхемі AMC1200

Напруга з сенсора (рис. 5) є стабільною і відображає точний рівень постійної складової вхідного сигналу, що важливо для моніторингу напруги постійного струму в системах електропостачання. Ця інформація використовується для подальшого аналізу та коригування параметрів ШІМ-сигналу, що генерується ESP32 для керування інвертором фільтра.

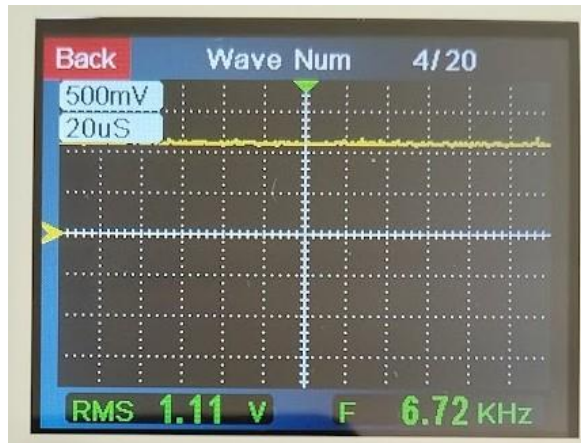


Рис. 5. Діаграма сигналу постійної напруги

Алгоритм формування ШІМ-сигналу [8] показаний на рис. 6. Зчитування аналогових сигналів з датчиків напруги та струму відбувається через АЦП ESP32. Далі сигнали проходять обробку, що включає фільтрацію та розрахунок гармонічних складових.

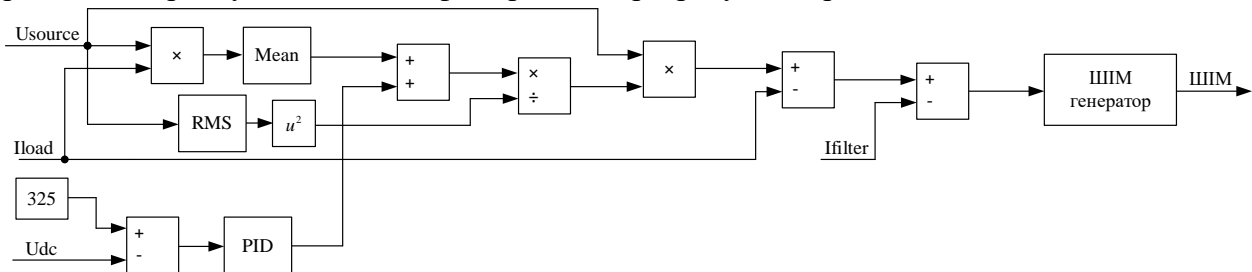


Рис. 6. Алгоритм обробки сигналів з сенсорів та генерації ШІМ-сигналу

Схема включає блок зчитування даних з сенсорів, обробку сигналів та генерацію керуючого ШІМ-сигналу. Система є інтегрованою та забезпечує швидке реагування на зміни параметрів мережі для ефективної роботи активного фільтра.

Для точного визначення потужності навантаження потрібно врахувати амплітудне значення напруги мережі за допомогою інтерполяції вхідних даних, показаних на рис. 7.

// Параметри розрахунку амплітудного значення напруги мережі

`const float V1 = 5.16;` // Цифрове значення для 325В

`const float V2 = 3.2;` // Цифрове значення для -325В

`const float AMP1 = 325;` // Відповідне амплітудне значення

`const float AMP2 = -325;` // Відповідне амплітудне значення

// Розрахунок амплітудного значення напруги мережі 325В

`float calculateAmplitude(float Vsource) {`

`// Лінійна інтерполяція між двома відомими точками`

`float slope = (AMP1 - AMP2) / (V1 - V2);`

`float intercept = AMP1 - slope * V1;`

`return slope * Vsource + intercept;`

// Напруга мережі

`int voltageSourceRaw = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_6);`

`float Vsource = (3.3 / 4096.0) * voltageSourceRaw * ((R1 + R2) / R2);`

`Vamp = calculateAmplitude(Vsource);`

Рис. 7. Фрагмент коду для розрахунку амплітудного значення напруги

Струм навантаження, що вимірюється за допомогою мікросхеми ACS712-30A, враховує спад напруги на датчику Холла, який потрібно перетворити в дійсне значення струму (рис. 8, а).

Під час вимірювання напруги конденсатора виникає похибка вимірювання 1%, в результаті недостатньої фільтрації вихідного сигналу, яку потрібно врахувати в коді, що показаний на рис. 8, б.

```
// Струм навантаження
```

```
int currentLoadRaw = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_7);  
float currentL = (3.3 / 4096.0) * currentLoadRaw * ((R3 + R4) / R4);  
Iload = (4.02 - currentL) / 0.066;
```

а)

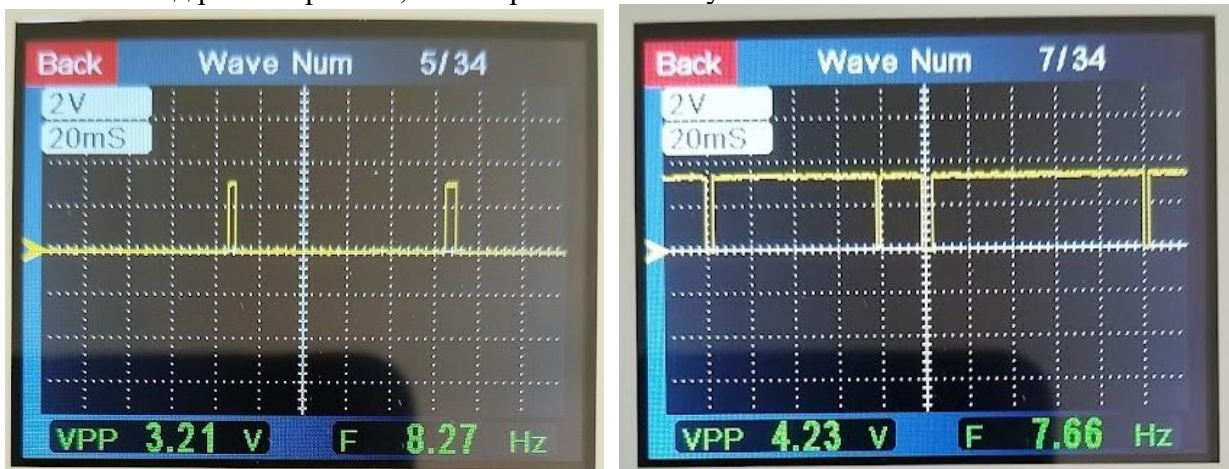
```
// Напруга конденсатора
```

```
int DCraw = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_3);  
float DCanalog = (DCraw * 3.3) / 4096.0;  
Udc = ((DCanalog * ((R7 + R8) / R8)) - (0.01 * (DCanalog * ((R7 + R8) / R8))))/10;
```

б)

Рис. 8. Фрагмент коду для зчитування струму та напруги за допомогою 12 бітного АЦП

Після виконання всіх перетворень, на виході ESP32 генерується ШІМ-сигнал, для керування інвертором активного фільтра. Він має верхній вихід HOUT (рис. 9, б) та нижній вихід LOUТ (рис. 9, а). ШІМ-сигнал є високочастотним, із заданою частотою 20 кГц, та дозволяє точно регулювати середнє значення напруги на виході інвертора для активної компенсації гармонічних спотворень. У якості навантаження використано блок живлення ноутбука потужністю 200 Вт. Частота і ширина імпульсів налаштовуються в залежності від рівня гармонік, які потрібно компенсувати.



а)

б)

Рис. 9. ШІМ-сигнал (а) LOUТ та (б) HOUT, згенерований ESP32 для керування інвертором

Висновки

У ході виконання даної роботи було розроблено пристрій керування силовим активним фільтром на базі мікроконтролера ESP32. Використання сенсорів напруги та струму на основі резистивних дільників забезпечило вимірювання електричних параметрів мережі в реальному часі.

Мікроконтролер ESP32 продемонстрував можливість генерації ШІМ-сигналів з розрядністю 16 біт, що дозволяє точно контролювати інвертор фільтра та забезпечує адаптивну компенсацію гармонік залежно від змінних умов роботи мережі. Завдяки багатозадачності та високій продуктивності ESP32, система здатна зчитувати, обробляти та реагувати на зміну параметрів мережі в реальному часі, що є ключовою вимогою для ефективного фільтрації гармонік.

Розроблена система базується на недорогих компонентах та легко інтегрується в існуючі електричні мережі, що робить її економічно вигідною для використання як в побутових, так і в промислових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. Й. Бурбело і Д. Ю. Лебедь, "Розробка цифрового блоку схеми керування напругою конденсатора активного фільтра," в *Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, Україна, 31 травня 2022 р. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2022/paper/view/15298>.
- [2] М. Й. Бурбело, Д. Ю. Лебедь і О. Р. Лещенко, "Оптимізація часу заряду/розряду конденсаторів активного фільтра під час коливань напруги," *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 119–124, 2022.
- [3] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець і Д. Ю. Лебедь, "Підвищення точності регулювання напруги на конденсаторі активного фільтра," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 1, с. 28–34, 2022.
- [4] Н. Okyere, M. Nibouche, H. Nouri, and O. Mrayat, "Application of DSPS and Microcontrollers in Voltage Source Inverters STATCOM Digital Designs: A Comparative Approach," in *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Signal Process. and Commun.*, ICSPC 2007, Dubai, 2007, pp. 321–324, doi: 10.1109/ICSPC.2007.4728320.
- [5] S. Benavides Cordoba, J. Ortiz, J. Cano, N. Munoz, and J. López-Lezama, "Implementation of a Distribution Static Compensator D-STATCOM: Hardware and Firmware Description," *Scientia et Technica*, vol. 24, pp. 555–561, 2020, doi: 10.22517/23447214.21601.
- [6] M. J. Triana Figueroa, J. L. Diaz Rodriguez, and A. Pardo Garcia, "Single-phase D-STATCOM prototype based on the use of an Arduino nano controller," in *Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development*, Buenos Aires, 2023, pp. 1031.
- [7] M. Mangaraj and A. K. Panda, "DSTATCOM deploying CGBP based icos ϕ neural network technique for power conditioning," *Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India*, received Aug. 24, 2016, accepted Nov. 13, 2016, available online Nov. 18, 2016, version of record Dec. 28, 2018.
- [8] K. Chenchireddy, K. Sreejyothi, and V. Kumar, "Comparative investigation of single-phase Distributed Grid-connected with and without D-STATCOM," *E3S Web of Conferences*, vol. 309, p. 01045, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202130901045.

Лебедь Денис Юрійович – аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com;

Вінницький національний технічний університет

D. Y. Lebed

DEVELOPMENT OF POWER ACTIVE FILTER CONTROL DEVICE ON ESP32 PLATFORM

Vinnitsia National Technical University

This work deals with the development of a control device for an active filter based on an ESP32 microcontroller. The main goal of the development is the effective compensation of harmonic distortions in electrical networks that arise under the influence of non-linear loads. The paper describes in detail the circuits of voltage and current sensors used to monitor network parameters, as well as their integration with ESP32 for data collection.

Voltage and current sensors play a key role in ensuring the accuracy of filter control. Their circuits include precision resistive dividers to measure voltage and Hall sensors to measure current. As a result of receiving signals from these sensors, an analog signal is generated, which is converted into a digital one using the built-in ESP32 ADC. Special attention is paid to the analysis of signal diagrams from sensors that demonstrate changes in electrical parameters in real time. This ensures quick response of the system to changes in the load and effective control of the active filter.

ESP32 performs the generation of a PWM signal, which serves to control the inverter of the active harmonic filter. The work considers the methods of generating PWM signals that ensure the minimization of harmonic distortions in the network. The generation of PWM signals takes place using a 16-bit generator, which allows for high accuracy and smooth control of voltage and current with the help of an inverter. Features of setting the frequency and pulse width for adaptation to changing operating conditions of the active filter control device are also given.

The algorithm for converting signals from sensors is based on high-speed reading of analog signals, their filtering and processing to form control actions. To ensure the operation of the power active filter control device, software code is used, which allows the system to simultaneously read data, generate a control signal and monitor network parameters.

The results of this study can be used in industrial systems and household networks to improve the quality of electrical energy by actively compensating harmonic distortions.

Keywords: power active filter, current sensor, voltage sensor, PWM signal, ESP32.

Lebed Denys Yuriyovich – graduate student of the department of electrotechnical systems of power consumption and energy management.