

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.391

О.Д. Азаров, І. С. Колесник, Л.В. Крупельницький

СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ГЕНЕРУВАННЯ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Генератор є важливою ланкою в багатьох електронних пристроях, чи це тестове, лабораторне обладнання, медичні або радіоелектронні системи. Крім технічних характеристик, важливими для користувача залишаються такі параметри, як зручність застосування, компактність і низька вартість генераторів. Тому, передумовою для подальшої роботи стало проведення дослідження та оцінка характеристик наявних систем цифрового створення аналогових сигналів. Проведене дослідження дозволило детально розглянути методики створення аналогових сигналів, інструменти для їх виконання, принципи роботи, їх сильні та слабкі сторони. На жаль, пристрої, які пропонують більшість виробників, є дорогими. У зв'язку з цим залишається актуальною проблема створення бюджетного макета генератора, здатного замінити більш дорогі чи застарілі моделі. Виробляється велика кількість інтегральних мікросхем, що дозволяють генерувати сигнали різної форми. Ці мікросхеми відрізняються за способом синтезу сигналів та технічними характеристиками. За методом синтезу сигналів вони поділяються на прямі аналогові синтезатори, непрямі синтезатори на основі фазового автопідстроювання частоти, прямі цифрові синтезатори та гібридні синтезатори. В даний час найбільшою популярністю користуються синтезатори на основі прямого цифрового синтезу завдяки перевагам, пов'язаним з широкою роздільною здатністю за частотою, високою якістю сигналу, можливістю цифрового керування, низькою вартістю, малим розміром корпусів та енергоспоживанням. На основі аналізу були запропоновані покращення, для цього розроблено структурну схему системи, описані нові блоки, їх роль та механізм дії, вибрані актуальні компоненти електроніки. Обґрунтовано вибір основних компонентів, якими є мікроконтролери STM32 з ядром Cortex-M4F від STMicroelectronics та цифровий синтезатор AD9850 від Analog Devices, Inc. В результаті була спроектована система цифрового генерування аналогових сигналів.

Ключові слова: система, генератор, ЦАП, DDS, STM32, AD9850.

Abstract. The generator is an important link in many electronic devices, whether it is test, laboratory equipment, medical or radio-electronic systems. In addition to technical characteristics, parameters such as ease of use, compactness and low cost of generators remain important for the user. Therefore, the prerequisite for further work was the study and evaluation of the characteristics of the existing systems for the digital generation of analog signals. The carried out research allowed to consider in detail the methods of creating analog signals, tools for their implementation, principles of operation, their strengths and weaknesses. Unfortunately, the devices offered by most manufacturers are expensive. A large number of integrated circuits are produced that allow you to generate signals of various shapes. These chips differ in the way the signals are synthesized [3] and in their specifications. According to the method of signal synthesis, they are divided into direct analog synthesizers, indirect synthesizers based on phase autotuning, direct digital synthesizers, and hybrid synthesizers. Currently, the most popular are synthesizers based on direct digital synthesis due to the advantages associated with high frequency resolution, high signal quality, digital control, low cost, small cabinet size, and power consumption. Based on the analysis, improvements were proposed. For this purpose, a structural diagram of the system has been developed, new blocks were described, their role and mechanism of action, and relevant electronic components were selected. The choice of main components, which are STM32 microcontrollers with Cortex-M4F core from STMicroelectronics and digital synthesizer AD9850 from Analog Devices, Inc., was justified. As a result, a system for the digital generation of analog signals was designed.

Key words: system, generator, DAC, DDS, STM32, AD9850.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-59-1-54-61>.

Вступ

Ще кілька років тому прямі цифрові синтезатори частоти (DDS) були рідкістю і мали обмежену сферу застосування, їх поширене використання було обмежене через складність реалізації, а також недостатньо широким діапазоном робочих частот. В сучасній електроніці DDS вже не сприймаються розробниками як складні, незрозумілі і дорогі пристрої.

Генератори відіграють ключову роль у функціонуванні великої кількості електронних пристроїв, зокрема, тестового та лабораторного обладнання, технічних систем для обслуговування різноманітних об'єктів. Важливими характеристиками для користувача, крім технічних параметрів, є зручність використання, компактність та доступність генераторів у фінансовому сенсі. Проте, більшість пристроїв, що пропонуються виробниками, є високобюджетними. Тому актуальним залишається питання створення економічного прототипу генератора, який би міг замінити більш дорогі або застарілі моделі.

Актуальність

Існує велика кількість інтегральних мікросхем, які дозволяють генерувати сигнали різних форм. Ці мікросхеми відрізняються за методом синтезу сигналів та технічними характеристиками. За способом синтезу вони поділяються на прямі аналогові синтезатори, непрямі синтезатори на основі фазового автопідстроювання частоти, прямі цифрові синтезатори та гібридні синтезатори. На сьогоднішній день найпопулярнішими є синтезатори на основі прямого цифрового синтезу (Direct Digital Synthesis, або DDS).

Для установки і управління цифровим синтезатором необхідний мікроконтролер. На сьогоднішній час найбільшою популярністю користуються мікроконтролери STM32.

Сімейство 32-розрядних мікроконтролерів STM32 на базі процесору Arm Cortex-M розроблене для того, щоб надати користувачам нові можливості, допомогою нових можливостей. Ці можливості полягають у поєднанні підвищення високої продуктивності при обробці цифрових сигналів у реальному часі і ефективності роботи з низьким енергоспоживанням, а ще забезпеченні простоти розробки при її повній інтеграції. Більшість моделей цієї платформи можна програмувати через USB-порт, що дозволяє підключити плату безпосередньо до комп'ютера. Пристрої на базі STM32 можуть функціонувати автономно або спільно з комп'ютерним програмним забезпеченням. Управління макетом може здійснюватися за допомогою периферійних пристроїв, таких як дисплеї, кнопки, сканери, або через персональний комп'ютер.

Мета

Метою дослідження є вдосконалення системи цифрового генерування аналогових сигналів за рахунок заміни окремих вузлів структурної схеми.

Постановка задач

1. Виконати аналіз існуючих систем цифрового генерування аналогових сигналів.
2. Розробити структурну схему.
3. Розробити програмне забезпечення для керування мікропроцесором.
4. Запропонувати варіанти модифікації та вдосконалення генераторів аналогових сигналів.
5. Дослідити та промодельовати варіанти цифрового генерування аналогових сигналів.

Аналіз аналогів

Генератори сигналів довільної форми можна поділити на генератори сигналів довільної форми і стандартних функцій (AFG) і генератори сигналів довільної форми (AWG).

AFG і AWG мають деякі спільні риси, хоча за конструкцією AFG є більш спеціалізованим приладом. Фактично, AWG являє собою складну систему відтворення, що створює сигнали на основі збережених цифрових даних, які описують рівні напруги сигналу змінного струму, який постійно змінюється [1].

Універсальні генератори сигналів Rigol DG5352 застосовують прямий цифровий синтез (технології DDS), що забезпечує стабільні, точні і «ідеальні» синусоїдальні сигнали з мінімальними спотвореннями. Генератори сигналів Rigol DG5352 прості при використанні: мають користувацькі інтерфейси і зручне управління, оскільки є візуальні інструкції. Вбудовані функції модуля AM, FM, PM і FSK значно розширюють сфери використання генератора.

Звукові генератори Rigol DG5352 можуть імітувати сигнали датчиків чи електронні схеми, це дозволяє використовувати звук для встановлення і тестування різного обладнання, а ще для обслуговування та досліджень. [3]

PROTEK 9305 – одна з наймасовіших та найвідоміших серій генераторів сигналів довільної форми, форма вихідного сигналу: прямокутник, синус, імпульс, трикутник, пилкоподібний, сходовий, довільний, кардіограма, $\sin(x)/x$, експонента, шум, логарифм тощо [1].

Прилад Hantek DDS-3005 має автоматичне калібрування. Генератор Hantek DDS-3005 може створювати спеціальні та стандартні електромагнітні сигнали різних видів: синусоїди, прямокутні, імпульсні, пилкоподібні, тощо. [1]

Універсальність дозволяє застосовувати пристрій під час налагодження, перевірки та налаштування різних каналів зв'язку та високоточних радіоелектронних приладів. Virізняється дуже низьким рівнем спотворення, високоточними результатами роботи завдяки низькому рівню похибки та оптимальним співвідношенням ціни і якості, може працювати з різними приладами.

Генератор сигналів Hantek DDS-3005 може працювати підключеним до ПК та автономно, в цьому генераторі є вбудований двоканальний частотомір діапазон якого сягає 2.7 ГГц.

Так як, пристрій має USB-інтерфейс, то для його роботи не потрібний блок живлення чи батареї. Користувач може створювати параметри сигналу, рисувати точку за допомогою комп'ютерної миші [6].

Розв'язання поставлених задач

Прямий цифровий синтез (ДДС) – один з найпопулярніших методів синтезу частот, який використовується в області цифрової обробки даних для отримання сигналу з необхідною частотою та фази сигналу фіксованої опорної частоти. Частоту, амплітуду і фазу сигналу можна регулювати в будь-який момент часу. Генератори DDS не схильні до температурного дрейфу та старіння. Єдиний елемент, який має нестабільність, є ЦАП. Завдяки високим технічним характеристикам генераторів DDS, сьогодні можна розробляти як звичайні синтезатори частот, так і аналогові функціональні генератори.

Виходячи з того, як побудовані класичні рішення генераторів (див. рис. 1), варто врахувати існуючі рішення та запропонувати вдосконалення. Принцип роботи синтезатора DDS [2, 9] полягає в наступному: в накопичувачі фази (НФ) формується послідовність кодів вихідного сигналу, що лінійно змінюється в часі. Як накопичувач фази використовується накопичуючий суматор (SM). Він являє собою регістр (RG), що перезавантажується в кожному такті роботи пристрою величиною, що дорівнює його старому вмісту, плюс деяка постійна добавка (код частоти). Вміст регістру RG лінійно збільшується в часі, а збільшення залежить від величини постійної добавки. Нагромаджуючий суматор, що використовується для формування коду фази, називають акумулятором фази. Акумулятор фази працює з періодичними переповненнями, що відповідає періодичній зміні функції і тактується по частоті f_{clk} від генератора (G). Частота переповнення акумулятора дорівнює вихідній частоті, і визначається за формулою: $f_{out} = K * f_0 / 2^n$, де f_{out} – вихідна частота, f_0 – тактова частота, K – код частоти, n – розрядність акумулятора фази.

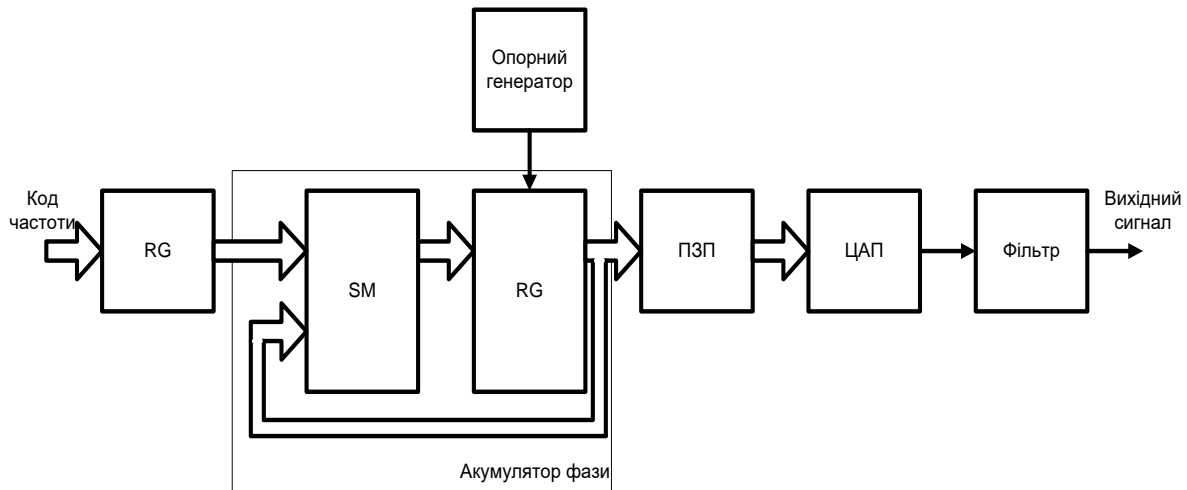


Рисунок 1 – Структура прямого цифрового синтезатора частоти

Зміни в накопичувачі фази відбуваються під впливом тактової частоти f_0 , що виробляється опорним генератором (ОГ), та коду частоти, яка генерується синтезатором. Значення амплітуди сигналу, що відповідають поточній фазі сигналу, вибираються з перекодувальної таблиці (Look Up Table), що розміщується в ПЗП. Вибір значення \sin проводиться за адресою в ПЗП із потрібною фазою. Значення з комірок пам'яті надходять на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), де виходить «ступінчастий» синусоїдальний сигнал. Для згладжування вихідного сигналу на виході ЦАП розташовується нижній фільтр частот (ФНЧ).

В якості вдосконалення запропоновано структурну схему (рисунок 2) в якій замінити окремі вузли: регістри, накопичуючий суматор, постійний запам'ятовуючий пристрій, опорний генератор на єдиний блок на базі мікроконтролерної системи, а також покласти на нього функції формувача коду фази, контролю поточної фази, значень для АЦП і функцій керування всією системою. Функції всіх згаданих вузлів виконуватиме мікроконтролер STM32.

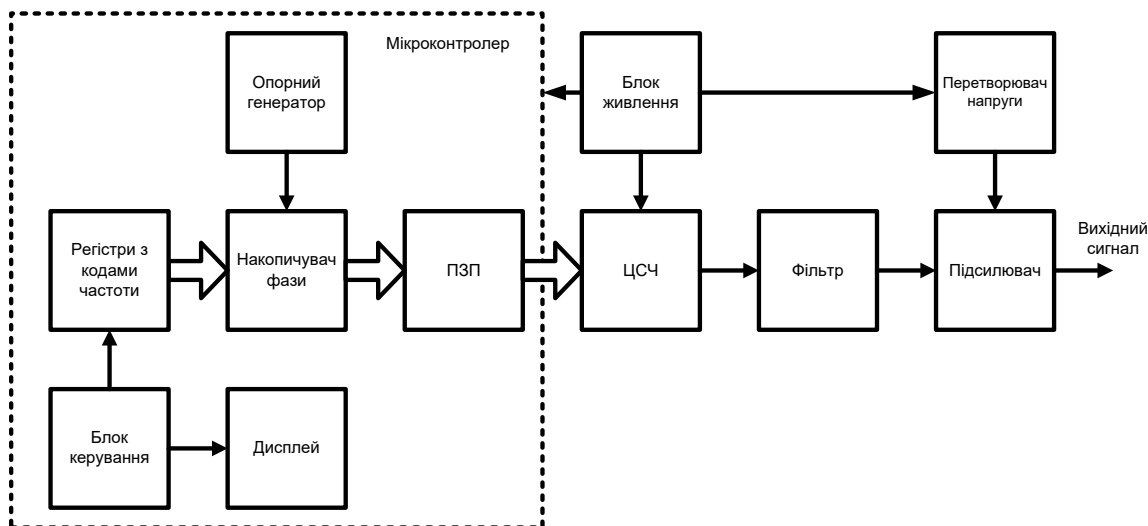


Рисунок 2 – Структура схема системи цифрового генерування аналогових сигналів

ЦАП замінити на сучасний високоточний швидкодіючий цифровий синтезатор частоти (ЦСЧ) AD9850 з цифровим керуванням із можливістю послідовної та паралельної передачі даних. Додати підсилювач вихідного сигналу для збільшення сили виходу. Такий підхід дозволить покращити характеристики генерування, підвищити точність та гнучкість управління, можливість подальшого вдосконалення і інтегрування в різні галузі діяльності.

Вдосконалення в розробці, яка проектується, можна продемонструвати на роботі генератора сигналів довільної форми (Arbitrary Waveform Generator) з комплекту віртуальних приладів NI ELVIS II. Для початку роботи з приладом, користувачем вказується файл, у якому міститься набір значень сигналу, що генерується (Waveform Name), і частота дискретизації (Update Rate), тобто частота, з якою відбувається зчитування цих значень з файлу (рисунок 3).

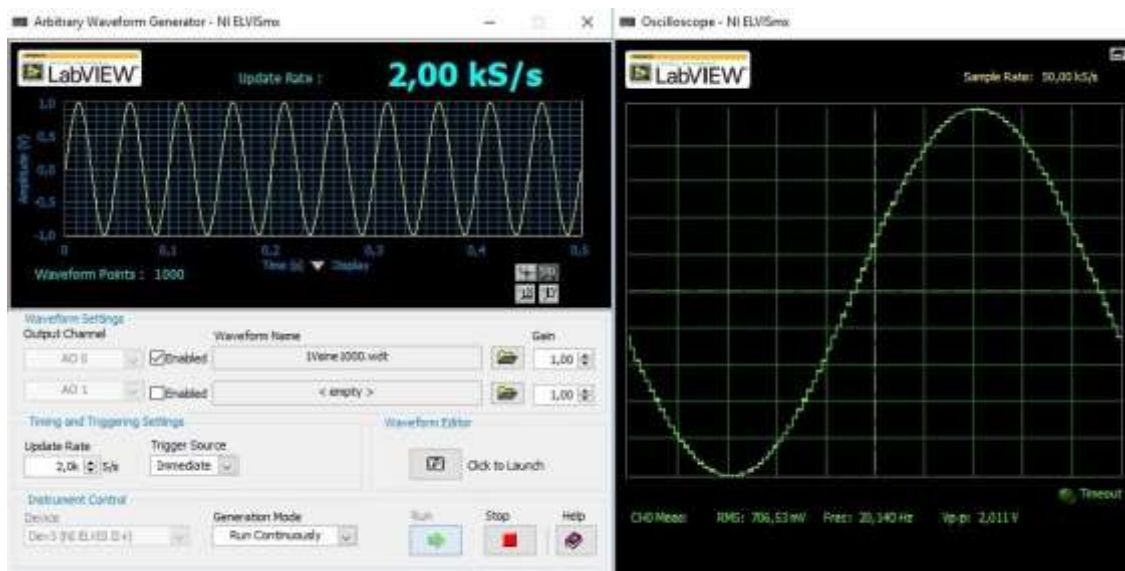


Рисунок 3 – Генерація гармонійного сигналу частотою 20 Гц

Збільшуючи чи зменшуючи частоту дискретизації, можна відповідно збільшувати чи зменшувати частоту вихідного сигналу.

Отриманий сигнал має «ступінчастий» вигляд і вимагає згладжування через ФНЧ, який взято з комплекту віртуальних приладів NI ELVIS II, його розрахунок, проведено за формулою:

$$\omega_{\text{гп}} = \frac{1}{C \times R'}$$

де ω_p – гранична частота фільтра, C – ємність конденсатора, R – опір резистора, можна підібрати відповідні елементи для ФНЧ.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра наведена на рисунку 5.

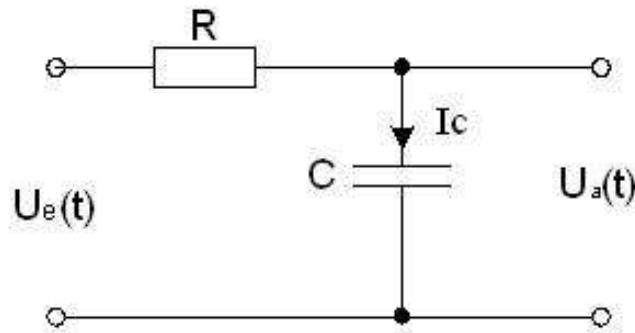


Рисунок 4 – Найпростіша схема ФНЧ до виходу генератора сигналів довільної форми

Вибираємо частоту сигналу генератора так, щоб вона потрапляла у смугу пропускання фільтра, наприклад, 700 Гц.

На рисунку 6 представлений вихідний сигнал генератора сигналів довільної форми до (сигнал 1) і після (сигнал 2) фільтрації. Результат згладжування сигналу фільтром помітний навіть візуально.

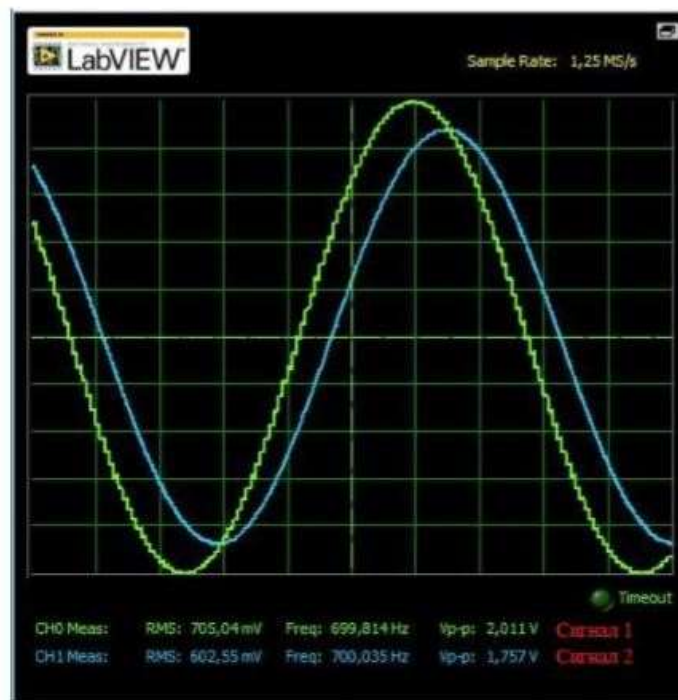


Рисунок 5 – Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ

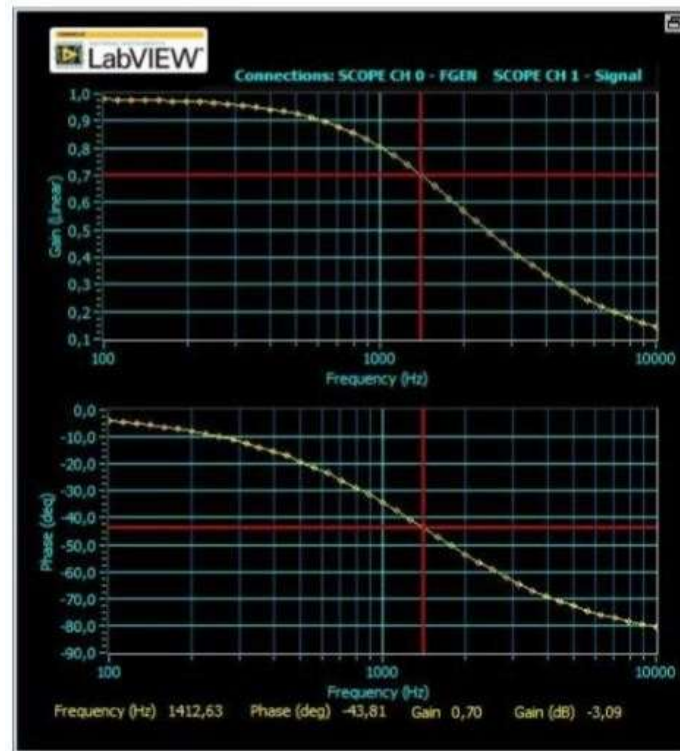


Рисунок 6 – Сигнал до та після фільтрації

Аналізатором спектра можна спостерігати суттєву зміну коефіцієнта гармонійних спотворень (КГС, англ. – Total Harmonic Distorsions – THD) сигналу після проходження через фільтр (рисунок 7). Як очевидно з рисунків без фільтра цей коефіцієнт дорівнює 1,07% (спектр 1), і з фільтром - 0,07% (спектр 2).

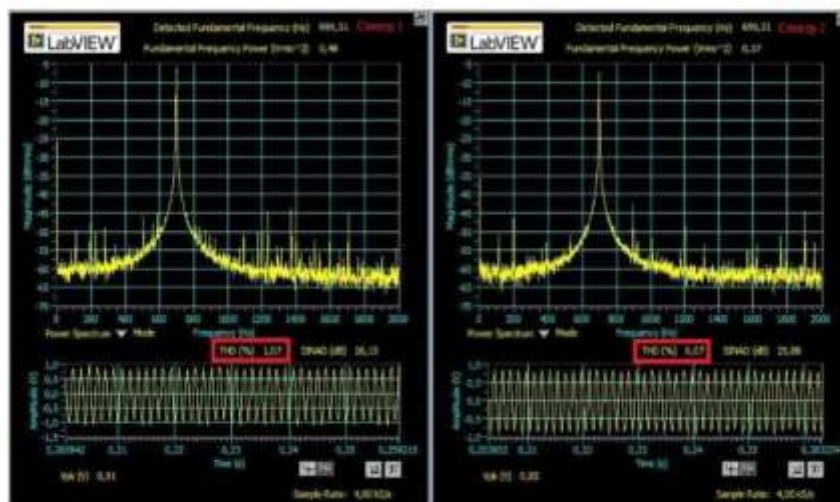


Рисунок 7 – Спектр сигналу до (ліворуч) та після (праворуч) фільтрації

Висновки

В межах цього дослідження виконано огляд та аналіз існуючих систем цифрового генерування аналогових сигналів, що дало змогу вивчити існуючі методи генерування

аналогових сигналів та засобів для їх реалізації, принципи їх функціонування і наявні переваги та недоліки.

Відповідно до розглянутих існуючих варіантів запропоновано вдосконалення.

Розроблено структурну схему системи, описано нововведені блоки та їх призначення і функціонування, підбрано реальні компоненти сучасної електроніки.

Після запропонованого вдосконалення є можливість реалізації декілька варіантів модифікації генераторів аналогових сигналів, а саме, побудувати таких генераторів:

- із використанням технічних можливостей плати STM32F4 Discovery;
- із використанням цифрового синтезатора AD9850 та STM32F4 Discovery, а також ArduinoLCDKeypadShield— для відображення інформації та зручного керування;
- STM32F429I Disco та цифрового синтезатора AD9850.

Список літератури

- [1] Carmine Noviello, *Mastering STM32*: eBook. Leanpub, 2018.
- [2] О.С. Кравчук, та В.І. Манаєнков, «Розробка функціонального генератора сигналів на основі прямого цифрового синтезу», *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*. № 4 (23). С. 22 - 26. 2007.
- [3] STM32F103C8 - Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN.. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.st.com/en/microcontrollers/microprocessors/stm32f103c8.html>
- [4] STM32CubeMX - STM32Cube initialization code generator. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> (дата звернення: 08.06.2021).
- [5] STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
- [6] Getting started with STM32 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:STM32_step_by_step_overview.
- [7] STM32-base project. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://stm32-base.org/guides/gettingstarted.html>.
- [8] STM32 microcontroller GPIO configuration for hardware. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <an4899-stm32-microcontroller-gpio-configuration-for-hardware-settings-and-lowpower-consumption.pdf>.
- [9] В.Н.Чинков, *Цифрові засоби вимірюваної техніки військового призначення: підручник*, Х.: ХУПС, 2007.

Стаття надійшла: 04.03.2024.

References

- [1] Carmine Noviello, *Mastering STM32*: eBook. Leanpub, 2018.
- [2] O.S. Kravchuk, V.I. Manayenkov, "Rozrobka funktsional'nogo heneratora syhnaliv na osnovi pryamoho tsyfrovoho syntezu", *Radioelektronni ta komp'yuterni systemy*. pp. 22 - 26. № 4 (23). 2007.
- [3] STM32F103C8 - Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers/microprocessors/stm32f103c8.html>.
- [4] STM32CubeMX - STM32Cube initialization code generator [Online]. Available: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.
- [5] STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>.
- [6] Getting started with STM32 [Online]. Available: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:STM32_step_by_step_overview
- [7] STM32-base project: veb-sayt. [Online]. Available: <https://stm32-base.org/guides/gettingstarted.html>.
- [8] STM32 microcontroller GPIO configuration for hardware. [Online]. Available: <an4899-stm32-microcontroller-gpio-configuration-for-hardware-settings-and-lowpower-consumption.pdf>.
- [9] Chynkov V.N. *Tsyfrovi zasoby vumiryuvanoyi tekhniky viys'kovoho pryznachennya: pidruchnyk*. Kh.: KHUPS, 2007.

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – доктор технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ.

Azarov, Olexiy D. – Doctor of Science (Tech.), head of the Department of Computer Engineering, Vinnytsya National Technical University

Колесник Ірина Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ

Kolesnyk, Iryna S. – PhD, Assistant Professor of the Department of Computer Engineering, Vinnytsya National Technical University

Крупельницький Леонід Віталійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ

Krupelnitskyi, Leonid V – PhD, Assistant Professor of the Department of Computer Engineering, Vinnytsya National Technical University

O. Azarov, I. Kolesnyk, L. Krupelnitsky

DIGITAL GENERATION SYSTEM FOR ANALOG SIGNALS

Vinnytsya National Technical University, Vinnytsya