

підстроювання 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 підключати 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 сферу 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 накопичувач 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 fclk 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.

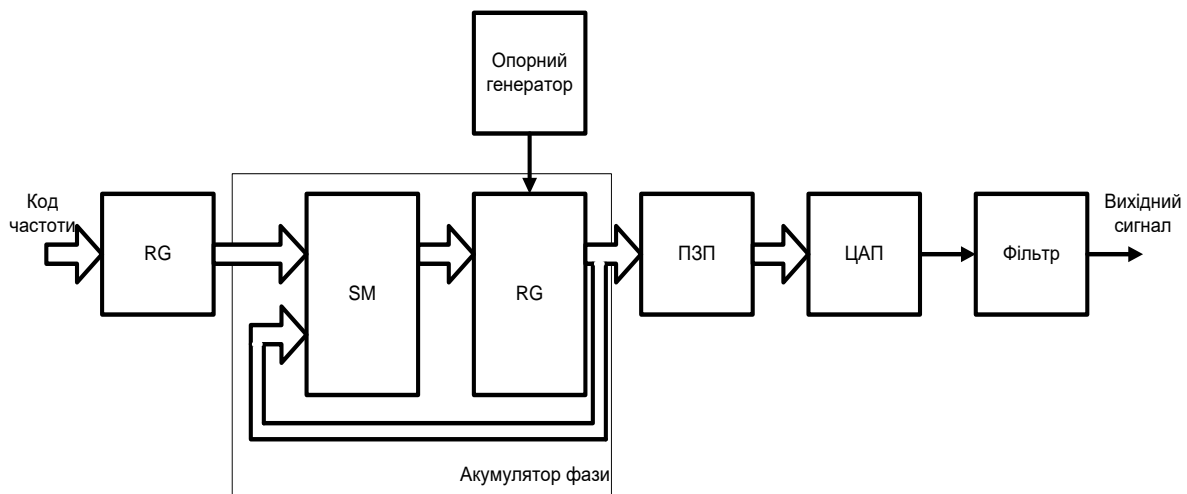


Рисунок 1 – Структура прямого цифрового синтезатора частоти

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).

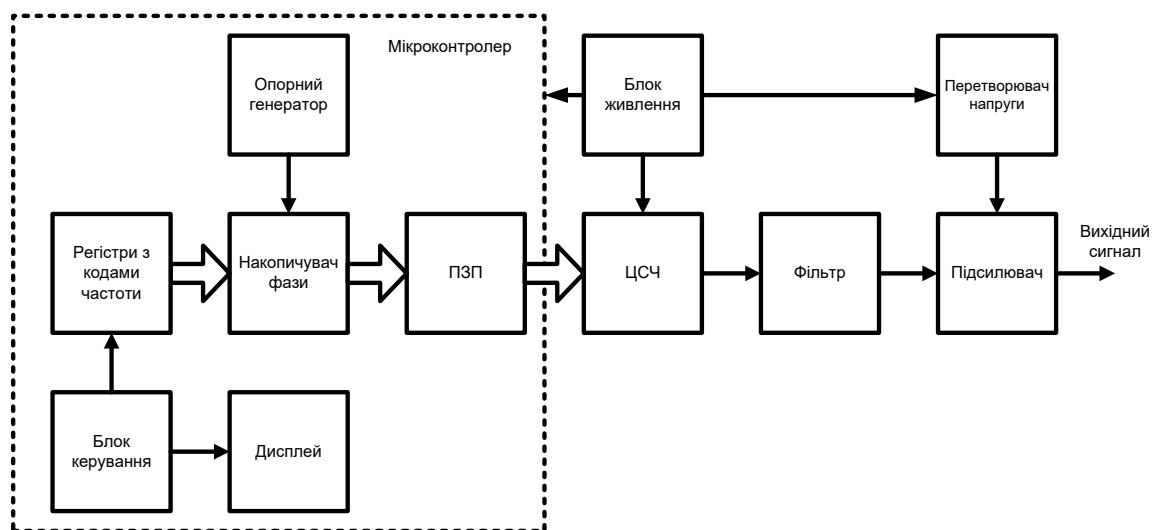


Рисунок 2 – Структура схема системи цифрового генерування аналогових сигналів

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.

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).

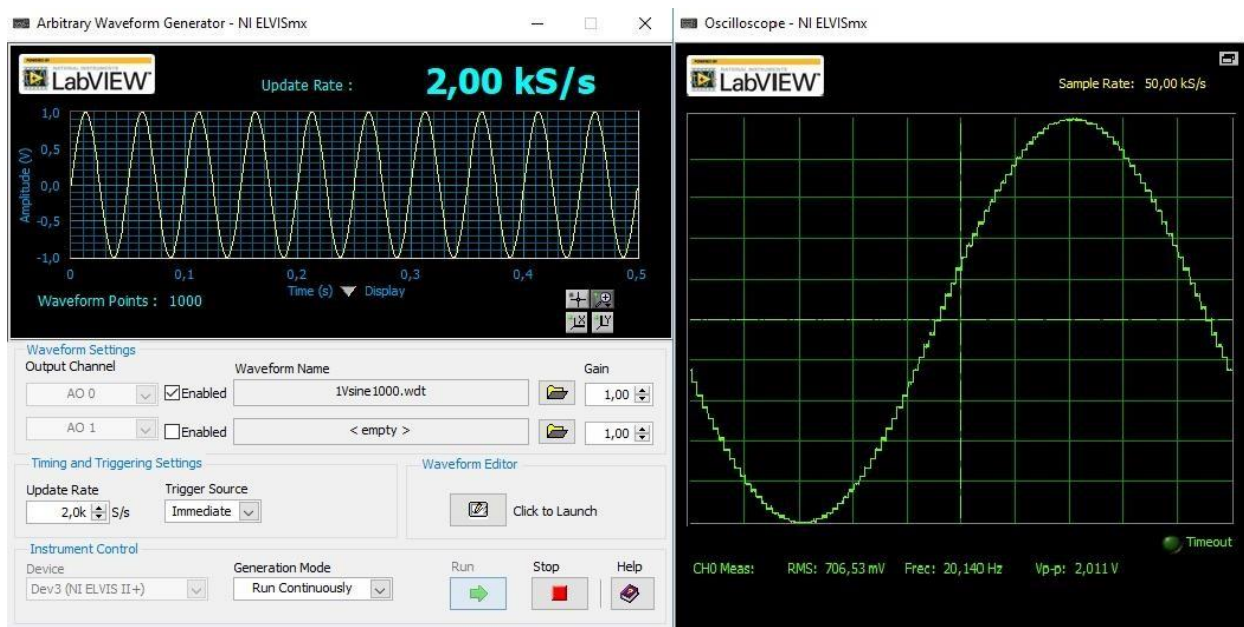


Рисунок 3 – Генерація гармонійного сигналу частотою 20 Гц

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

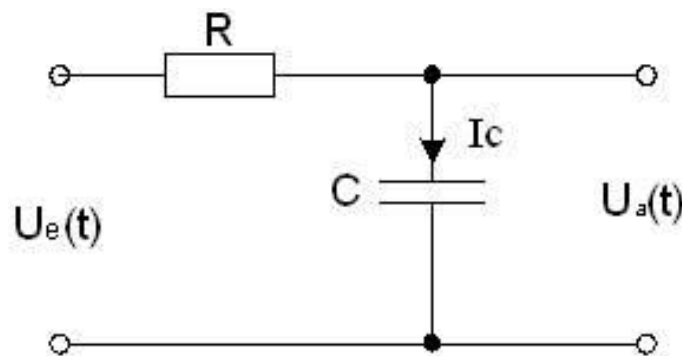


Рисунок 4 – Найпростіша схема ФНЧ до виходу генератора сигналів довільної форми

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

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

де $\omega_{гр}$ – гранична частота фільтра, C – ємність конденсатора, R – опір резистора, можна підібрати відповідні елементи для ФНЧ.

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

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.

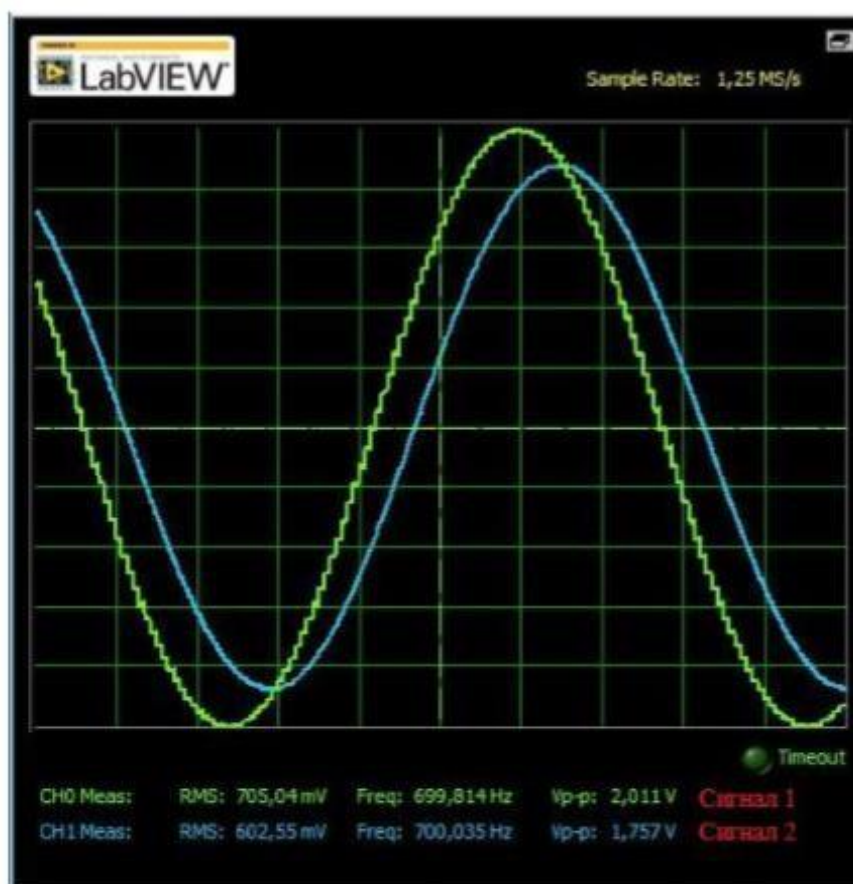


Рисунок 5 – Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ

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).

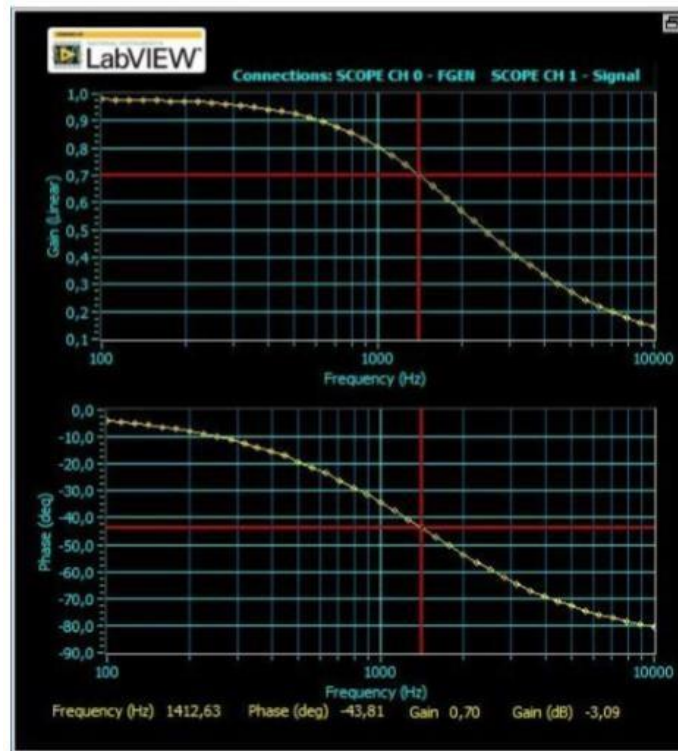


Рисунок 6 – Сигнал до та після фільтрації

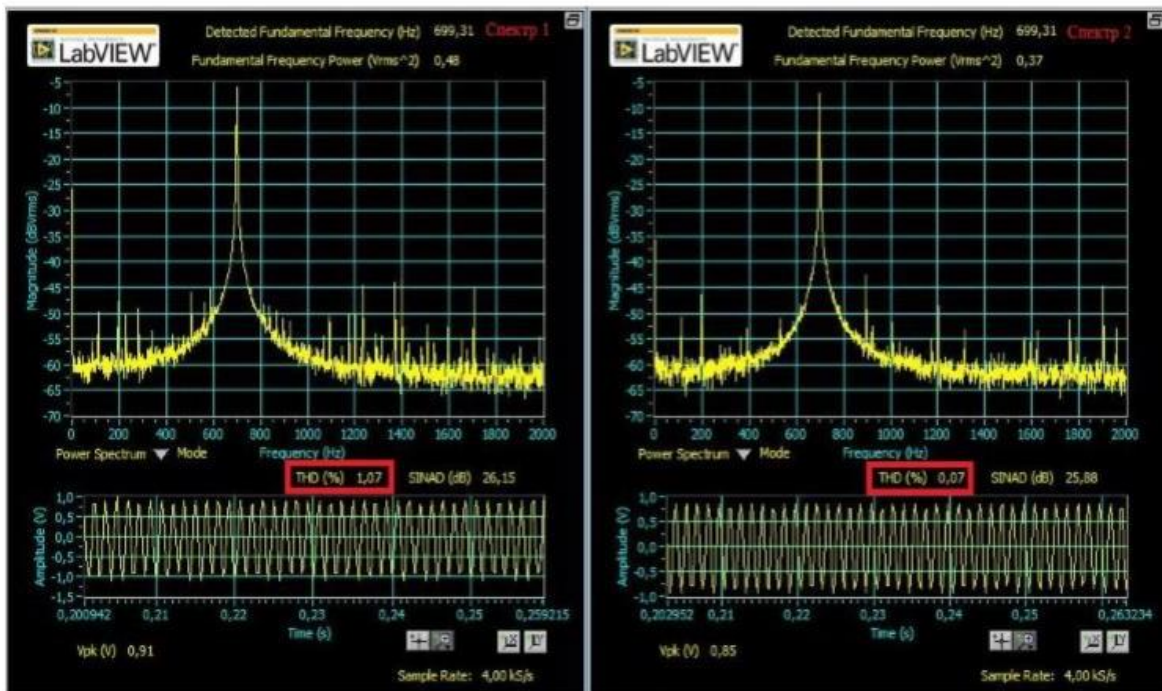


Рисунок 7 – Спектр сигналу до (ліворуч) та після (праворуч) фільтрації

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, побудуви 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/microcontrollersmicroprocessors/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/micro-controllers/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-hardwaresettings-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, ta V.I. Manayenkov, «Rozrobka funktsional'noho heneratora syhnaliv na osnovi pryamoho tsyfrovoho syntezy», *Radioelektronni ta komp'yuterni systemy*. № 4 (23). p. 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.. [Online]. Available:: <https://www.st.com/en/microcontrollersmicroprocessors/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/micro-controllers/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. [Online]. Available: <https://stm32-base.org/guides/gettingstarted.html> .
- [8] STM32 microcontroller GPIO configuration for hardware. [Online]. Available: <an4899-stm32-microcontroller-gpio-configuration-for-hardwaresettings-and-lowpower-consumption.pdf> .
- [9] Chynkov V.N. *Tsyfrovi zasoby vymiryuvanoi tekhniki 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