

УДК 004.312.466-022.513:004.4'2

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.08

С. Р. ВЯЛОВ, А. В. ДУНАЙ

АТ «Елемент», Одеса, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ СЕРІЇ STM32 У ВИРОБАХ АВІАЦІЙНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Предмет дослідження – середовища розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів серії STM32, які відіграють важливу роль у електронному забезпеченні сучасної авіації та є невід'ємною частиною процесу розробки авіонічних систем. **Мета.** Вибір найактуальнішої системи програмування мікроконтролерів серії STM32 для виробів авіаційної галузі. **Завдання.** Огляд основних популярних середовищ розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів STM32, таких як STM32CubeIDE, VisualGDB, IAR Embedded Workbench for ARM, Keil MDK, Arm Development Studio та Simulink. Розглянуто різні аспекти систем програмування, включаючи розробку програмного забезпечення, доступність функцій та інтеграцію зі засобами розробки та оточеннями. **Методи дослідження.** Проведення порівняльного аналізу; відокремлення характерних особливостей використання середовищ програмування в пристроях авіоники на прикладі підприємства АТ «Елемент». З огляду на використання середовищ у сфері авіоники особливу увагу було надано сертифікації та надійності на прикладах стандартів безпеки, верифікації та засобів тестування. **Результати.** Виявлено, що для всіх розглянутих середовищ розробки притаманні налагодження коду, аналіз пам'яті, оптимізація коду та інші базові функції. Виявлено відмінні риси, які притаманні окремим середовищам програмування, серед яких симуляція роботи мікроконтролера, висока продуктивність і швидкість компіляції, відкритий вихідний код, оптимізація, підтримка від виробника, а також кількість документації, включаючи посібники користувача, приклади коду, форуми підтримки, навчальні курси, вебінари та статті від компанії-розробників. **Висновки (наукова і практична новизна).** Результати аналізу надають важливі висновки щодо кращого вибору систем програмування мікроконтролерів STM32 у виробі авіаційного застосування. Зроблені порівняння та аналіз допоможуть розробникам програмного забезпечення вибрати найбільш підходящу систему програмування для їхніх конкретних потреб. Зроблено висновок про доцільність використання для розробки авіаційного програмного забезпечення на базі STM32 таких середовищ розробки, як IAR Embedded Workbench for ARM та STM32CubeIDE.

Ключові слова: мікроконтролери серії STM32; системи програмування; авіаційні системи; порівняльний аналіз.

Вступ

Сфера авіоники вимагає впровадження програмного забезпечення найвищого рівня для забезпечення найвищої надійності та безпеки бортових систем. Мікроконтролери серії STM32 надають можливості розробки такого програмного забезпечення. Однак, вибір середовища розробки програмного забезпечення є важливим рішенням, яке може суттєво впливати на ефективність, надійність та продуктивність систем, що розробляються.

Метою даної статті є порівняльний аналіз таких систем програмування як STM32CubeIDE, Visual GDB, IAR Embedded Workbench for ARM, Keil MDK, Arm Development Studio та Simulink на прикладі розробки пристроїв авіаційного застосування на базі мікроконтролерів STM32.

Для досягнення поставленої мети необхідно наступні завдання:

- проаналізувати основні можливості та функції кожної з проаналізованих систем програмування;
- визначити переваги і недоліки кожної системи програмування для завдань розробки авіаційної апаратури;
- виділити найбільш оптимальну систему програмування, яка забезпечує баланс між функціональністю, зручністю розробки та витратами.

Критеріями для вибору середовищ програмування були актуальна підтримка розробником середовищ програмування, наявність графічного інтерфейсу та підтримка мов C та C++.

1. Огляд систем програмування мікроконтролерів STM32

У даному розділі розглядаються основні системи програмування мікроконтролерів серії STM32, їх характеристики, функціональні можливості та об-

меження. В рамках аналізу розглядаються такі системи програмування, як STM32CubeIDE, Visual GDB, Keil MDK, IAR Embedded Workbench for ARM та Simulink. Для кожної системи наводиться опис основних функцій та можливостей, доступних розробникам.

STM32CubeIDE є офіційним середовищем розробки для STM32, розробленим самою компанією STMicroelectronics. Воно базується на відкритому середовищі розробки Eclipse і має інтегровані функції розробки, такі як налагоджувач, підтримку HAL (Hardware Abstraction Layer) та генерацію коду. STM32CubeIDE є потужним інструментом з багатьма можливостями і добре підходить для розробки складних програмних проєктів [1].

IAR Embedded Workbench for ARM є інтегрованим середовищем розробки з фокусом на вбудовані системи ARM. Воно надає широкі можливості для програмування STM32-мікроконтролерів, включаючи налагодження в реальному часі, оптимізацію коду та підтримку різних пристроїв JTAG/SWD. IAR Embedded Workbench for ARM має потужні інструменти, які можуть бути корисними для вимогливих проєктів у сфері авіаційного застосування [2].

VisualGDB є комерційним додатком, який надає підтримку для програмування STM32 у середовищі Visual Studio. Він забезпечує інтеграцію з платформою STM32CubeMX, має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та зручні функції налагодження. VisualGDB також підтримує ряд інших мікроконтролерів та платформ, що дозволяє розширити його функціональність [3].

Arm Development Studio є потужним інтегрованим середовищем розробки, розробленим компанією Arm для програмування мікроконтролерів ARM. Воно надає розширені можливості для налагодження в реальному часі, профілювання, аналізу продуктивності та оптимізації коду. Arm Development Studio є потужним інструментом для вимогливих проєктів, які вимагають високої продуктивності та ефективності [4].

Keil MDK (Microcontroller Development Kit) є інтегрованим середовищем розробки, розробленим компанією ARM, що спеціалізується на мікроконтролерах. Воно надає широкі можливості для програмування STM32, включаючи налагодження в реальному часі, оптимізацію коду та інтеграцію зі засобами HAL. Keil MDK також підтримує широкий спектр мікроконтролерів, що дозволяє розробляти проєкти на різних платформах [5].

Simulink (Matlab) є середовищем моделювання та симуляції, розробленим компанією MathWorks. Воно надає засоби для розробки моделей системи з графічним інтерфейсом, що полегшує процес розробки програмного забезпечення для STM32. За допомогою додаткових пакетів, таких як STM32 Target for

Simulink, можна генерувати код, який може бути виконаний на STM32-мікроконтролері. Simulink є корисним інструментом для моделювання та розробки систем авіаційного застосування [6].

2. Аналіз і порівняння систем програмування

У цьому розділі проводиться детальний аналіз та порівняння розглянутих систем програмування на основі визначених критеріїв. Порівняння здійснюється з точки зору їхньої придатності для авіаційного виробництва, враховуючи особливості цієї галузі.

З точки зору функціональних можливостей всі перелічені середовища розробки мають притаманні середовищам програмування функції, такі як: налагодження коду, автоматичне завершення коду, аналіз пам'яті, оптимізація коду та багато інших корисних функцій. Окрім цього присутня інтеграція з інструментом для генерації коду та конфігурації периферійних пристроїв – STM32CubeMX, що набагато полегшує розробку програмного коду. Присутні також й важливі відмінності, такі як: симуляції роботи мікроконтролера, яка присутня в Keil MDK, IAR Embedded Workbench for ARM, Arm Development Studio та Simulink, але відсутня в інших середовищах.

Продуктивність систем програмування може бути важливою у виробі авіаційного застосування, де часто вимагається швидка реакція на події та оптимізація ресурсів. STM32CubeIDE, IAR та Keil MDK відомі своєю високою продуктивністю та швидкістю компіляції. VisualGDB також може бути ефективним вибором, оскільки вона базується на інструментах з відкритим вихідним кодом, таких як GNU Compiler Collection (GCC), які відомі своєю швидкістю та оптимізацією. Simulink поступається продуктивністю згенерованого коду за рахунок багатьох перевірок для забезпечення надійності.

Що стосується документації та підтримки офіційне середовище розробки STM32CubeIDE зазвичай має найбільшу кількість документації та підтримки від виробника. STMicroelectronics надає широкий спектр документації, включаючи посібники користувача, приклади коду та форуми підтримки. Keil MDK, IAR Embedded Workbench for ARM та MathWorks також має достатньо документації та підтримки та мають якісні навчальні курси, вебінари та статті від компаній-розробників. VisualGDB має повну документацію та вебінари на сайті розробника. Arm Studio Має документацію, навчальні курси, настанови й статті.

Так як мова йде про використання в авіоніці важливим критерієм вибору є сертифікація та надійність. Для сертифікації програмного забезпечення

необхідно дотримуватись рекомендацій та вимог даних стандартів. При створенні програмного забезпечення для авіонних систем, які використовують мікроконтролери STM32 необхідно дотримуватися специфічних норм і стандартів, таких як DO-178C (Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification) який визначає вимоги до розробки програмного забезпечення для авіоніки, включаючи вимоги до процесів розробки, верифікації, валідації та конфігураційного керування [7]. У процесі сертифікації проводяться різні аналізи, тестування та верифікація програмного забезпечення з метою демонстрації його відповідності вимогам безпеки та надійності [8]. IAR Embedded Workbench for ARM має компілятор IAR C/C++ Compiler, який сертифікований за стандартами IEC 61508, ISO 26262, EN 50128 та EN 50657, IEC 62304, ISO 25119, IEC 62061, EN ISO 13849-1, IEC 6301. STM32CubeIDE та Keil MDK сертифіковані за стандартами DO-178C (авіаційна сертифікація) або ISO 26262 (автомобільна сертифікація). Пакет Matlab для використання в авіації сертифікований за стандартами ARP-4754, DO-254, MISRA, Space Flight Software Standards, UK Aerospace and Defense - High-Integrity Systems. Visual Studio не кваліфікована для авіаційного застосування [8].

Також важливим критерієм для забезпечення надійності програмного коду є наявність засобів тестування. STM32CubeIDE містить вбудовані засоби для одиничного тестування (unit testing) коду на мовах C та C++ за допомогою фреймворку Unity. Можливе покриття коду тестами до 100%. Тести можуть автоматично виконуватися при компіляції проекту. VisualGDB підтримує тестування одиниць коду з використанням стандартного фреймворку від Microsoft. Тести в Visual Studio можуть виконуватися як окремо, так і у складі безперервної інтеграції. IAR Embedded Workbench for ARM, Keil MDK та Arm Development Studio не мають вбудованих засобів автоматичного тестування, проте підтримують налагодження та аналіз покриття коду, що також можна використовувати з метою тестування. Simulink - це середовище візуального моделювання, тестування і кодогенерації для вбудованих систем, яке призначене в першу чергу не для тестування коду, а для створення алгоритмів керування та отримання вихідного коду для популярних вбудованих процесорів.

Щодо можливостей розширення, STM32CubeIDE і Arm Studio, будучи відкритими середовищами, можливо легше розширити за допомогою плагінів, тем тощо. Keil MDK і IAR Embedded Workbench for ARM менш гнучкі.

З точки зору вартості STM32CubeIDE розповсюджується під ліцензією GPLv3 та являється без-

коштовними. Keil MDK має безкоштовну некомерційну версію. Інші середовища програмування мають більш високу вартість.

3. Особливості застосування

Розглянемо особливості застосування на прикладі підприємства АТ «Елемент». Вперше використовувати мікроконтролери STM32 в пристроях авіоніки почали використовувати більш ніж десять років тому. На той час для розробки програмного забезпечення доцільно було використовувати середовище програмування IAR Embedded Workbench for ARM за рахунок високої підтримки контролерів цих типів. В подальшому перехід на інші середовища програмування не є доцільним тому, що зміна середовища є трудомістким процесом та не забезпечує необхідної надійності програмного коду, так як наявне середовище має свій компілятор.

Для розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів STM32 в пристроях, що використовуються безпосередньо в літаючих апаратах доцільно буде використовувати STM32CubeIDE, перевагами якого є глибока інтеграція з STM32CubeMX, ергономічність інтерфейсу, наявності інтегрованого інструменту тестування, а також те що дане середовище програмування розповсюджується під ліцензією GPLv3 та являється безкоштовними.

Для розробки програмного забезпечення пристроїв технічного обслуговування, таких як КПТО-117В, апаратний ключ доступу тощо, було обрано використовуватися VisualGDB завдяки ергономічності його інтерфейсу, швидкодії та наявності інтегрованого інструменту тестування.

Висновок

Кожне з розглянутих середовищ розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів серії STM32 має свої переваги та обмеження. STM32CubeIDE та VisualGDB є зручними та функціональними середовищами, проте поступаються за надійністю комерційним рішенням. IAR Embedded Workbench та Keil MDK - професійні системи, що надають потужні інструменти оптимізації, налагодження та розробки. Вони є платними, але надають можливості для ефективної розробки. Arm Development Studio також є потужним професійним середовищем, розробленим безпосередньо виробником процесорів. Simulink дозволяє здійснювати моделювання, автоматичну генерацію коду та візуальну розробку, проте не надає деяких необхідних інструментів для реального проекту.

Як результат, найбільш рекомендованими системами для розробки авіаційного програмного забезпечення на базі STM32 є IAR Embedded Workbench for ARM за рахунок інструментів відлагодження, симуляції та сертифікації компілятора, а також STM32CubeIDE за рахунок наявності інтегрованого інструменту тестування програмного забезпечення, великому рівню інтеграції з мікроконтролерами серії STM32, широкою підтримкою спільноти та розробником та є абсолютно безкоштовним.

Для розробки програмного забезпечення для технологічного устаткування кращим вибором буде VisualGDB за рахунок ергономічності інтерфейсу, швидкодії та наявності інтегрованого інструменту тестування.

Висновок полягає в тому, що для конкретного застосування важливо обрати найбільш підходящу систему програмування, яка задовольняє всі вимоги та обмеження проекту.

Внесок авторів: формулювання проблеми – С. Р. Вялов; аналіз і порівняння систем програмування – С. Р. Вялов, А. В. Дунай.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Integrated Development Environment for STM32 Documentation* [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії ST. – Режим доступу: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html#documentation> – 10.02.2023.
2. *IAR Embedded Workbench for Arm, Functional Safety* [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії IAR. – Режим доступу: <https://www.iar.com/products/requirements/functional-safety/iar-embedded-workbench-for-arm-functional-safety/> – 10.02.2023.
3. *VisualGDB Documentation* [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії SysProgs. – Режим доступу: <https://visualgdb.com/documentation/> – 10.02.2023.
4. *Arm Development Studio Resources* [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії ARM. – Режим доступу: <https://developer.arm.com/Tools%20and%20Software/Arm%20Development%20Studio#Resources> – 10.02.2023.
5. *Keil MDK Resources* [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії ARM. – Режим доступу: <https://developer.arm.com/Tools%20and%20Software/Keil%20MDK> – 10.02.2023.
6. *MATLAB and Simulink for Aerospace and Defense* [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/solutions/aerospace-defense/standards/> – 10.02.2023.
7. *RTCA: DO-178C Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification* [Text]. RadioTechnical Commission for Aeronautics, 2011.
8. *Нерубаский, В. В. Вопросы выбора и квалификации средств разработки программного обеспечения для электронных систем автоматического управления авиационных двигателей* [Текст] / В. В. Нерубаский, Д. А. Лавренко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 4 спецвипуск 2 (182). – С. 80-85. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.12.

References

1. *Integrated Development Environment for STM32 Documentation*. Available at: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html#documentation> (accessed 10.02.2023).
2. *IAR Embedded Workbench for Arm, Functional Safety*. Available at: <https://www.iar.com/products/requirements/functional-safety/iar-embedded-workbench-for-arm-functional-safety/> (accessed 10.02.2023).
3. *VisualGDB Documentation*. Available at: <https://visualgdb.com/documentation/> (accessed 10.02.2023).
4. *Arm Development Studio Resources*. Available at: <https://developer.arm.com/Tools%20and%20Software/Arm%20Development%20Studio#Resources> (accessed 10.02.2023).
5. *Keil MDK Resources*. Available at: <https://developer.arm.com/Tools%20and%20Software/Keil%20MDK> (accessed 10.02.2023).
6. *MATLAB and Simulink for Aerospace and Defense*. Available at: <https://www.mathworks.com/solutions/aerospace-defense/standards/> (accessed 10.02.2023).
7. *RTCA: DO-178C Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*. RadioTechnical Commission for Aeronautics, 2011.
8. *Nerubasskij, V. V. & Lavrenjuk, D. A. Voprosy vybora i kvalifikacii sredstv razrabotki programmnoho obespechenija dlja jelektronnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija aviacionnyh dvigatelej* [Questions of selection and qualification of software development tools for electronic systems of automatic control of aircraft engines]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4sup2 (182), pp. 80-85. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.12.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STM32 SERIES MICROCONTROLLER INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT IN AVIATION PRODUCTS*Serhii Vialov, Andrii Dunai*

The subject of the research is the software development environment for STM32 series microcontrollers, which play an important role in the electronic support of modern aviation and are an integral part of the development process of aircraft systems. **Goal.** The selection of the most current STM32 series microcontroller programming system for aviation products. **Tasks.** Overview of major popular software development environments for STM32 microcontrollers such as STM32CubeIDE, VisualGDB, IAR Embedded Workbench for ARM, Keil MDK, Arm Development Studio, and Simulink. Various aspects of programming systems are considered, including software development, feature availability, and integration with development tools and environments. **Research methods.** Carrying out a comparative analysis; separation of the characteristic features of the use of programming environments in avionic devices using the example of JSC "Element". In view of the use of environments in the field of avionics, special attention was paid to certification and reliability using examples of safety standards, verification, and testing tools. **The results.** It was found that code debugging, memory analysis, code optimization, and other basic functions are inherent to all considered development environments. Distinguishing features inherent in individual programming environments are identified, including microcontroller robot simulation, high performance and compilation speed, open source code, optimization, support from the manufacturer, and a wealth of documentation, including user manuals, code examples, support forums, training courses, webinars, and articles from development companies. **Conclusions (scientific and practical novelty).** The results of the analysis provide important conclusions regarding the better choice of STM32 microcontroller programming systems in aviation products. The comparisons and analyses made will help software developers choose the most suitable programming system for their specific needs. A conclusion was made about the feasibility of using development environments such as IAR Embedded Workbench for ARM and STM32CubeIDE for developing aviation software based on STM32.

Keywords: STM32 series microcontrollers; programming systems; aviation systems; comparative analysis.

Вялов Сергій Русланович – інженер-електронік, АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Дунай Андрій Віталійович – інженер-електронік, АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Serhii Vialov – Electronic Engineer of JSC «Element», Odessa, Ukraine,
e-mail: vialov0608@gmail.com, ORCID: 0009-0006-7784-8896.

Andrii Dunai – Electronic Engineer of JSC «Element», Odessa, Ukraine,
e-mail: adunay99@gmail.com, ORCID: 0009-0009-8639-7777.