

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ МІКРОКОНТРОЛЛЕРА НА БАЗІ STM32 В СУЧАСНІ ПРИЛАДИ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРАМИ

Волоніхін В.Д.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: vadym.volonikhin@nure.ua

У роботі досліджено можливість інтеграції мікроконтролера на базі STM32 у сучасні прилади керування світлофорами. Проведено аналіз існуючих апаратних платформ (STM32 Nucleo/Discovery), сенсорних інтерфейсів, зокрема індукційних петель SWARCO, тепловізійних камер FLIR і пішохідних кнопок RTB, а також протоколів зв'язку DSRC/IEEE 802.11p для V2X-комунікацій. Оцінено ефективність реалізації адаптивної фазової логіки на основі STM32 (фіксовані та змінні цикли) і методи забезпечення відмовостійкості та аварійних сценаріїв згідно з вимогами DIN V VDE V 0823-500 та рекомендаціями RiLSA.

Ключові слова: STM32, світлофор, інтеграція, надійність, сенсори, адаптивне керування.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF INTEGRATION OF A STM32-BASED MICROCONTROLLER INTO MODERN TRAFFIC LIGHT CONTROL DEVICES

Volonikhin V.D.

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave. 14

E-mail: vadym.volonikhin@nure.ua

This work investigates the feasibility of integrating an STM32-based microcontroller into modern traffic signal control devices. An analysis was performed on existing hardware platforms (STM32 Nucleo/Discovery boards), sensor interfaces such as SWARCO inductive loops, FLIR TrafiOne thermal cameras, and RTB pedestrian push buttons, as well as DSRC/IEEE 802.11p protocols for V2X communication. The effectiveness of implementing adaptive phase logic on the STM32 platform (both fixed and variable cycles) was evaluated, along with fault-tolerance mechanisms and emergency scenarios in accordance with DIN V VDE V 0823-500 requirements and RiLSA guidelines.

Keywords: STM32, traffic signal, integration, reliability, sensors, adaptive control.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ. Зважаючи на постійне зростання обсягів автомобільного потоку в місті, питання надійності й безпеки електронних систем керування світлофорами набуває особливої важливості. Сучасні перехрестя обслуговують тисячі автомобілів і пішоходів щодня, і будь-які збої в роботі контролера чи сенсорів (індукційні петлі, камери, пішохідні кнопки) можуть призводити до заторів, аварій або навіть соціальних конфліктів. Відповідність жорстким вимогам стандартів DIN V VDE V 0823-500 і рекомендацій RiLSA є ключовим фактором при проектуванні таких систем, оскільки вони визначають критерії відмовостійкості, електромагнітної сумісності й аварійних сценаріїв.

ВСТУП. Для того щоб забезпечити ефективне й безперервне регулювання міського трафіку, необхідно враховувати такі основні загрози:

- відмови електроживлення або мережі зв'язку, які можуть призводити до повного знеструмлення контролера;
- електромагнітні перешкоди (ЕМС-проблеми), здатні впливати на точність роботи таймерів і інтерфейсів мікроконтролера;

– відмова сенсорів, наприклад індукційних петель чи відеокамер, що призводить до некоректної детекції транспортних засобів;

– кіберзагрози (атаки на протоколи V2X, DSRC / IEEE 802.11p), які можуть порушити обмін даними між вузлами інфраструктури.

Також передбачена матеріально-технічна база:

– апаратна база: мікроконтролер STM32H743VIT6 (ARM Cortex-M7, 400 МГц), індукційні петлі SWARCO FUTURIT, тепловізійні камери FLIR TraficOne, пішохідні кнопки RTB APS із вібро- та акустичною індикацією.

– програмні інструменти: STM32CubeMX для конфігурації периферії, STM32CubeIDE для розробки коду, EasyEDA для моделювання електричних схем і таймінгів світлофорних фаз.

– нормативно-методичні джерела: DIN V VDE V 0823-500 (електротехнічні та програмні вимоги до приладів керування світлофорами), RiLSA (методики розташування сигналів, фазова логіка, «час затухання»), ISO/TS 14812 (термінологія ITS).

Формули для фазової логіки світлофора:

1) цикл роботи світлофора:

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_i Y_i}$$

де C – оптимальна тривалість циклу(с), L – загальна тривалість втрат часу на старт/затухання (с), Y_i – ступінчасті насичення потоку для кожної фази

2) Розрахунок часу затухання:

$$R(\text{clear}) = \frac{d}{v(\text{vehicle})}$$

де d – відстань, яку має подолати транспортний засіб для очищення перехрестя, v_{vehicle} – середня швидкість транспортних засобів під час виїзду (м/с)

Після визначення часових інтервалів і алгоритмів фазової логіки доцільно зосередитися на ключових характеристиках мікроконтролера STM32H743VIT6, які роблять його оптимальним вибором для сучасних пристроїв керування світлофорами:

а) висока продуктивність:

– ARM Cortex-M7 зі швидкістю до 400 МГц забезпечує можливість виконувати складні обчислення в реальному часі — адаптивне регулювання фаз, обробку даних з камер FLIR та індукційних петель без затримок;

– вбудований двочастотний FPU (floating-point unit) прискорює математику з плаваючою комою, що корисно при розрахунку коефіцієнта завантаження й алгоритмах оптимізації цикла.

б) великий об'єм пам'яті:

– 2 МБ Flash і 1 МБ SRAM дають змогу розмістити як код керування світлофорами, так і буфери для зберігання кадрів з відеокамер та даних сенсорів;

– інтегрований ART Accelerator скорочує час доступу до Flash і прискорює виконання критичних завдань.

в) розвинені периферійні інтерфейси:

– до 3 каналів FMPI2C, 6 SPI та 8 USART для підключення індукційних петель, камер, пішохідних кнопок і модулів V2X;

– таймери з підтримкою “дед-тайму” та PWM-генерації дозволяють точно формувати сигнали керування для LED-індикаторів;

– два контролери Ethernet і CAN FD дають змогу реалізувати високошвидкісну та надійну мережеву взаємодію між перехрестями.

г) низьке енергоспоживання та надійність:

– режими Sleep/Stop зі споживанням від 50 мА гарантують енергоефективність навіть при автономному живленні;

– вбудовані блоки BOR, POR, мультифазний WDT та ECC-перевірка пам'яті запобігають неконтрольованим відмовам у складних умовах експлуатації.

д) функції кібербезпеки та безпеки функціональної:

– апаратна підтримка TrustZone та AES-шифрування для захисту прошивки та каналів зв'язку V2X;

– відповідність вимогам стандарту IEC 61508 (SIL 3) та DIN V VDE V 0823-500 щодо самодіагностики і аварійного переходу в безпечний стан.

Формула періоду таймера (Timer):

$$T = \frac{(PSC + 1)(ARR + 1)}{F(TIM)}$$

де PSC (prescaler) – значення прескалера, ARR (Auto-Reload Register) – значення в регістрі автоперезавантаження, F_{Tim} – тактова частота таймера (частота шини APB, помножена на 1 або 2 залежно від конфігурації)

У таблиці 1 нижче наведено порівняння аналогів та можливих процесорів та мікроконтролерів які використовуються в актуальних приладах керування трафіком .

Таблиця 1 – Порівняння найпоширеніших процесорів та мікроконтролерів для сучасних приладів керування світлофорами.

Процесор/мікроконтролер	Архітектура та ключові характеристики	Ціна за штуку(\$)
1	2	3
STM32H743VIT 6	ARM Cortex-M7 @ 480 МГц; 2 МБ Flash, 1 МБ SRAM; DSP, FPU, Art Accelerator, L1-кеш; Вбудований контролер зовнішньої пам'яті, Ethernet, CAN-FD, USB, високошвидкісні інтерфейси.	16
NXP S32K344	ARM Cortex-M7 @ до 160 МГц (двоядерний); Сертифікація ISO 26262 ASIL-D; Вбудовані CAN, CAN-FD, LIN, Ethernet, апаратна безпека	21
TI TMS570LC4357	Два ARM Cortex-R5F у lock-step @ 300 МГц; 4 МБ Flash, 512 КБ RAM; Сертифікація IEC 61508 SIL-3, ISO 26262 ASIL-D	35

Продовження таблиці 1

1	2	3
Infineon AURIX TC275	3-ядерний TriCore™ @ 200 МГц + DSP; 4 МБ Flash з ECC, 472 КБ RAM; ISO 26262 ASIL-D, вбудований HSM;	~600
Renesas R-Car H3e	Quad ARM Cortex-A57 @ 2 ГГц + Quad Cortex-A53 @ 1.2 ГГц; Dual Cortex-R7 для реального часу ISO 26262 ASIL-B	Н/д*
Microchip SAMA5D27	ARM Cortex-A5 @ 500 МГц; Готовий модуль: DDR2, Ethernet PHY, Flash, PMIC; Підтримка real-time Linux	38
Xilinx Zynq-7000 XC7Z010	Dual ARM Cortex-A9 @ 667 МГц + FPGA Artix-7; 28 К LUT, HP-/ACP-інтерфейси для детермінованості; Аналіз відеопотоків у реальному часі	18

Основні переваги мікроконтролера на базі STM32.

– висока продуктивність ядра

Мікроконтролери STM32H7 засновані на ядрі ARM Cortex-M7 з тактовою частотою до 480 МГц та вбудованим FPU і DSP-оптимізаціями для швидкої обробки сигналів і математичних операцій.

– низьке енергоспоживання

Різноманітні режими енергозбереження (Stop, Standby, Low-power Run) та технологія динамічного масштабування напруги дають змогу зменшити споживання до кількох мікроамперів, що критично для енергонезалежних систем

– широкий набір периферійних інтерфейсів. Підтримка USART, SPI, I²C, CAN-FD, USB, Ethernet, ADC/DAC, таймерів та інших інтерфейсів дозволяє реалізувати складну систему керування світлофорами без додаткових контролерів;

– розвинена екосистема розробки. Інструменти STM32CubeMX (графічне налаштування периферії і генерація коду) та STM32CubeIDE (редактор, компілятор, відлагодження) спрощують і прискорюють розробку програмного забезпечення;

– масштабованість і портабельність коду. Уніфікована модель регістрів і API HAL/LL по всіх сімействах STM32 забезпечує зручний перенос проєктів між різними мікроконтролерами з мінімальними змінами коду;

– функції безпеки та криптографії. Моделі серії STM32L5/M33 із TrustZone, вбудовані криптографічні прискорювачі та механізми захисту пам'яті (MPU, PC-ROP) дозволяють реалізувати безпечні сценарії обробки конфіденційних даних;

– покращена обробка пам'яті через кеш і prefetch. Кеш L1 і механізми prefetch у STM32H7-сімействі знижують затримки доступу до Flash-пам'яті й підвищують загальну продуктивність додатків;

– гнучкі умови живлення. Діапазон живлення 1,7 ... 3,6 В дозволяє застосовувати STM32 у різних системах, включаючи автономні батарейні рішення та живлення від сонячних панелей;

– вбудований DMA-контролер. Підтримка DMA звільняє процесор від обробки великих

обсягів даних, що підвищує швидкість комунікацій із сенсорами та інтерфейсами без затрат обчислювальних ресурсів;

– висока конкурентоспроможність вартості. Оптимальний баланс продуктивності та ціни робить STM32 привабливим вибором для масових рішень у транспортній інфраструктурі.

Є дуже багато мікроконтролерів на базі процесорів STM32, але я б хотів звернути увагу саме на китайську плату DevEBox STM32H7XX_M. Ця плата випускається у двох версіях: з потужним модулем STM32H743VIT6 (2 МБ Flash, 1 МБ SRAM) та більш бюджетним STM32H750VBT6 (128 КБ Flash, 1 МБ SRAM)

Обидві версії мають ідентичний форм-фактор і розводку контактів, що робить їх взаємозамінними у проєктах без додаткових змін у платі (рис. 1)

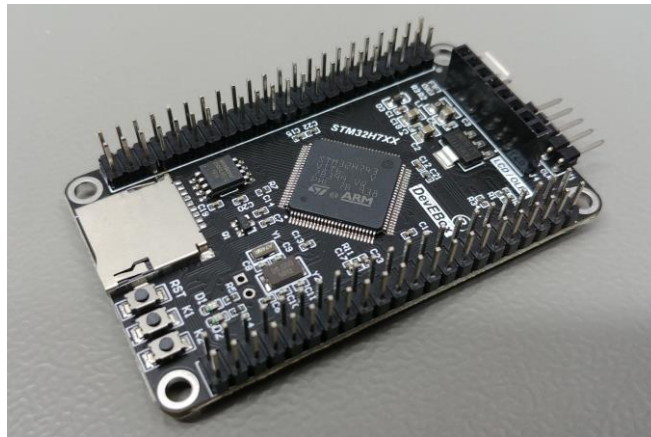


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд китайського мікроконтролеру DevEBox на базі процесору STM32H743VIT6

STM32H743VIT6 демонструє продуктивність до 1327 DMIPS і підтримує FPU та DSP-оптимізації, що особливо корисно для реалізації складних алгоритмів фазового керування світлофорами в реальному часі. Плата оснащена широким набором інтерфейсів (USB, UART, SPI, I²C, CAN, Ethernet), що дозволяє безпосередньо підключати індукційні петлі, тепловізійні камери та інші сенсори без додаткових вузлів розширення.

Особливість DevEBox STM32H7XX_M — вбудований режим DFU, який спрощує оновлення прошивки через USB без необхідності окремого програматора (рис. 2). За рахунок конкурентної ціни (орієнтовно 10–18 AUD за модуль) і високої функціональності ця плата є відмінним вибором як для прототипування, так і для промислових рішень у сфері автоматизації міського трафіку.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд “програматора” ST-LINK V2 ST Microelectronics

ВИСНОВКИ. Для реалізації задач автоматизованого управління міським трафіком найбільш доцільним є використання мікроконтролера STM32H743VIT6, що поєднує високу продуктивність, широкий набір периферії та низьке енергоспоживання. Вибір плати DevEBox STM32H743VIT6 дозволяє швидко розгортати прототипи систем керування світлофорами з підтримкою адаптивної логіки та безпечної взаємодії з сенсорними модулями. Поєднання стандартів DIN VDE, рекомендацій RiLSA та сучасної апаратної бази дає змогу досягти високої надійності, безпеки та гнучкості розробленої системи. Подальша інтеграція з V2X-комунікаціями та штучним інтелектом відкриває перспективи для створення інтелектуальної транспортної інфраструктури.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.

1. FGSV Verlag. Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) – Guidelines for Traffic Signal Systems. URL: <https://www.fgsv-verlag.de/rilisa-e>
2. Europan.ua. “Міжнародна стандартизація. Німецькі стандарти DIN та VDE”. URL: <https://europan.ua/ru/news/mezhdunarodnaja-standartizacija-nemeckie-standarty-din-i-vde/>
3. STMicroelectronics. “STM32H743VI – High-performance and DSP with DP-FPU, Arm Cortex-M7 MCU”. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h743vi.html>
4. STMicroelectronics. Datasheet STM32H743xI/G (PDF). URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h743vi.pdf>
5. STMicroelectronics. “STM32H7 Series – Products”. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h7-series.html>
6. SWARCO FUTURIT. “Inductive Loop Detectors”. URL: <https://www.swarco.com/products/urban-traffic-solutions/loop-detectors> (Приклад виробника індукційних петель для детекції транспортних засобів)
7. FLIR Systems. “TrafOne Thermography Cameras”. URL: <https://www.flir.com/products/trafione/> (Тепловізійні камери для моніторингу дорожнього руху)
8. RTB Safe Traffic. “APS Pedestrian Push Buttons”. URL: <https://www.rtbtraffic.com/en/products/push-buttons/> (Пішоходні кнопки з вібро- та акустичною індикацією)
9. STMicroelectronics. “STM32CubeMX”. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>
10. STMicroelectronics. “STM32CubeIDE”. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
11. Wikipedia. “Vehicle-to-Everything (V2X)”. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle-to-everything>
12. NXP Semiconductors. “S32K Automotive MCUs (S32K344)”. URL: <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-microcontrollers/s32-k-automotive-cortex-m-based-microcontrollers:S32K344>
13. Texas Instruments. “Hercules Safety MCUs – TMS570LC4357”. URL: <https://www.ti.com/product/TMS570LC4357>
14. Infineon Technologies. “AURIX™ TC275 Microcontrollers”. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/microcontroller/32-bit-tricore-microcontroller-aurix/aurix-tricore-tc2xx-series/tc275t/>
15. Renesas Electronics. “R-Car® H3e Processor for Automotive Applications”. URL: <https://www.renesas.com/us/en/products/mpc/automotive-r-car/r-car-h3>

16. Microchip Technology. “SAMA5D27 Single-Board Computer”. URL: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/SAMA5D27>
17. Xilinx (AMD). “Zynq®-7000 All Programmable SoC Family – XC7Z010”. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>
18. ISO. ISO/TS 14812:2022 – Intelligent transport systems – Vocabulary. URL: <https://www.iso.org/standard/62048.html>
19. CEN/TC 278. Intelligent Transport Systems Standards. URL: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:46440,2612&cs=1451A3
20. Institute of Transportation Engineers. Traffic Control Devices Handbook, 8th ed., ITE, 2020. URL: <https://www.ite.org/publications/traffic-control-devices-handbook/>
21. Demska, N., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalailah, A. (2025). ANALYSIS OF METHODS, MODELS AND ALGORITHMS FOR A COLLABORATIVE ROBOTS GROUP DECENTRALIZED CONTROL. ACUMEN: International journal of multidisciplinary research, 2(2), 235-249.
22. Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025: Thesises of Reports of II st All-Ukrainian Conference, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17.
23. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 3046116.
24. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 9140156.
25. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2023). Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0 (Doctoral dissertation, European Scientific Platform).
26. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. International Journal of Crowd Science, 9(1), 29-43.
27. Невлюдов, І. Ш., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). MODEL DEVELOPMENT OF DYNAMIC REPRESENTATION A MODEL DESCRIPTION PARAMETERS FOR THE ENVIRONMENT OF A COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR WITHIN THE INDUSTRY 5.0 FRAMEWORK. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(79), 42-48.
28. Maksymova, S., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Bahlai, O. (2024, May). Balancing System For A Zoomorphic Spot Type Mobile Robot Development Using An Accelerometer MPU 6050 (GY-521). In 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) (pp. 39-42). IEEE.
29. . Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2024). Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services (AWS) Technologies and Smart Health Care. International Journal of Crowd Science, 8.
30. Abu-Jassar, A., Al-Sukhni, H., Al-Sharo, Y., Maksymova, S., Yevsieiev, V., & Lyashenko, V. (2024). Building a Route for a Mobile Robot Based on the BRRT and A*(H-BRRT) Algorithms for the Effective Development of Technological Innovations.

Науковий керівник: Демська Наталія Павлівна, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки