

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної
техніки», за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему «Вбудована система інтеграції та цифрової діагностики
електронних модулів бортової мережі автомобіля»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РЕ-22

Бессонов Тарас Олегович _____

Керівник:

к.т.н., доцент, доцент кафедри ПРЕ

Лашевська Наталія Олександрівна _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Бессонову Тарасу Олеговичу

- 1.** Тема роботи «USB-адаптер для діагностики автомобіля на базі мікроконтролера STM32F411RCTx з підтримкою протоколів CAN та K-Line та гальванічною ізоляцією», керівник роботи Лащевська Наталія Олександрівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2025 р. № _____-с.
- 2.** Термін подання студентом роботи _____ червня 2026 р.
- 3.** Вихідні дані до роботи: Апаратне забезпечення: мікроконтролер STM32F411RCTx (ARM Cortex-M4), CAN-трансивер з гальванічною ізоляцією ISO1050DUB, K-Line драйвер NUP2105L, захисні компоненти USBLC6-2SC6, оптрон 6N137, бортова мережа автомобіля (роз'єм OBD-II). Методичні матеріали: стандарти ISO 11898-1/2 (CAN-bus), ISO 15765-4 (Diagnostic on CAN), ISO 9141-2, ISO 14230-4 (K-Line/KWP2000), ISO 14229 (UDS), IEC 61000-4-2 (EMC).
- 4.** Зміст роботи: провести аналіз ринку засобів автомобільної діагностики та виявити недоліки існуючих рішень; вивчити теоретичні основи діагностичних протоколів OBD-II — CAN (ISO 15765-4) та K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4); розробити апаратну архітектуру USB-адаптера з повною гальванічною ізоляцією між автомобільною шиною та інтерфейсом USB; обґрунтувати вибір кожного ключового компонента принципової схеми; виконати математичні розрахунки для верифікації схемотехнічних рішень та визначення граничних умов експлуатації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Вступ. Мета та завдання роботи
2. Актуальність теми. Об'єкт та предмет дослідження
3. Аналіз ринку засобів автомобільної діагностики
4. Теоретичні основи протоколу CAN (ISO 15765-4)
5. Теоретичні основи протоколу K-Line (ISO 9141-2, KWP2000)
6. Загальна архітектура пристрою. Структурна схема
7. Вибір та обґрунтування компонентів схеми
8. Принципова електрична схема адаптера
9. Математичні розрахунки схемотехнічних рішень
10. Висновки

6. Дата видачі завдання 04.03.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	14.04.26-06.05.26	Виконано
2	Розробка та аналіз завдання на проєкт	07.05.26-10.05.26	Виконано
3	Розробка функціональної схеми та вибір компонентів	11.05.26-18.05.26	Виконано
4	Розробка схеми електричної принципової	19.05.26-23.05.26	Виконано
5	Розробка друкованої плати	24.05.26-29.05.26	Виконано
7	Оформлення дипломної роботи	06.06.26-08.06.26	Виконано

Студент

Тарас БЕССОНОВ

Керівник

Наталія ЛАЩЕВСЬКА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить 70 сторінок основного тексту, 9 таблиць, 15 рисунків, 1 додаток (схема електрична принципова), 15 бібліографічних джерел.

Метою дипломної роботи є розробка та проектування USB-адаптера для діагностики автомобіля на базі мікроконтролера STM32F411RCTx із підтримкою двох ключових протоколів бортової діагностики — CAN (ISO 15765-4) та K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP2000) — та забезпечення повної гальванічної ізоляції між автомобільною шиною та інтерфейсом USB.

Об'єктом дослідження є система провідного доступу до бортових діагностичних мереж автомобіля через стандартний роз'єм OBD-II. Предметом дослідження є апаратна архітектура та схемотехнічні рішення USB-адаптера діагностики автомобіля з гальванічною ізоляцією на базі мікроконтролера STM32F411RCTx.

У роботі проведено детальний аналіз ринку засобів автомобільної діагностики — розглянуто три сегменти: професійне обладнання (Bosch KTS, Autel MaxiSys, Launch X431), споживчі адаптери (клони ELM327, OBDLink, Kiwi 3, vLinker) та відкриті апаратні платформи (CANable, STN1170, STM32-based). Виявлено системний недолік ринку — відсутність гальванічної ізоляції у всіх доступних рішеннях — та сформульовано технічне завдання на розробку.

Розглянуто теоретичні основи діагностичних протоколів OBD-II: детально описано фізичний рівень та структуру кадрів CAN (ISO 15765-4) з механізмом побітового арбітражу та транспортним протоколом ISO 15765-2;

описано протокол K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4) з процедурами ініціалізації (5-baud init, Fast Init), часовими параметрами та структурою повідомлень KWP2000. Наведено порівняльний аналіз протоколів за ключовими характеристиками.

Розроблено апаратну частину адаптера на основі дворівневої архітектури з двома гальванічно ізольованими доменами: USB-домен (мікроконтролер STM32F411RCTx, USB 2.0 Full Speed, стабілізатор AMS1117-3.3) та AUTO-домен (ізольований CAN-трансивер ISO1050DUB, драйвер K-Line L9637D). Обґрунтовано вибір семи ключових компонентів. Детально описано шість функціональних вузлів принципової схеми з поясненням призначення кожного компонента, рівнів сигналів та схемотехнічних рішень.

Виконано математичні розрахунки схеми (формули (4.1)–(4.10)): розраховано режими роботи стабілізатора AMS1117-3.3 (максимальна розсіювана потужність 1,456 Вт при $V_{BAT} = 14,4$ В) та ізольованого DC/DC перетворювача NXE1S0505MC (ККД 80%, завантаження 24%); верифіковано часові параметри CAN-інтерфейсу (затримки ISO1050DUB 50 нс у петлі, запас по Prop_Seg 220 нс); розраховано параметри K-Line ланцюга (відповідність ISO 9141-2 підтверджено); виконано тепловий аналіз ($T_J = 118,5$ °C < 125 °C при $T_A = 85$ °C з майданчиком 25×25 мм); визначено граничні умови експлуатації.

Практичне значення роботи полягає у розробці апаратного рішення, що усуває системний недолік ринку — відсутність гальванічної ізоляції — при орієнтовній собівартості компонентів 15–25 доларів США. Пристрій може бути рекомендований для застосування у навчальних закладах,

науково-дослідних лабораторіях та для розробки власного програмного забезпечення автомобільної діагностики.

Ключові слова: STM32F411RCTx, OBD-II, CAN, K-Line, ISO 15765-4, ISO 9141-2, ISO 14230-4, гальванічна ізоляція, ISO1050DUB, L9637D, USB, діагностика автомобіля, NXE1S0505MC, PCB817, ELM327.

ABSTRACT

The explanatory note for the thesis contains 70 pages of main text, 9 tables, 15 figures, 1 appendix (schematic diagram), and 15 bibliographic references.

The purpose of the thesis is the development and design of a USB adapter for vehicle diagnostics based on the STM32F411RCTx microcontroller, supporting two key on-board diagnostic protocols — CAN (ISO 15765-4) and K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP2000) — with full galvanic isolation between the vehicle bus and the USB interface.

The object of research is the system of wired access to the on-board diagnostic networks of a vehicle through a standard OBD-II connector. The subject of research is the hardware architecture and circuit design solutions of a vehicle diagnostic USB adapter with galvanic isolation based on the STM32F411RCTx microcontroller.

The thesis presents a detailed analysis of the vehicle diagnostics market across three segments: professional equipment (Bosch KTS, Autel MaxiSys, Launch X431), consumer adapters (ELM327 clones, OBDLink, Kiwi 3, vLinker), and open hardware platforms (CANable, STN1170, STM32-based projects). A systemic market deficiency was identified — the absence of galvanic isolation in

all available solutions — and a technical specification for the development was formulated.

The theoretical foundations of OBD-II diagnostic protocols are examined in detail: the physical layer and CAN frame structure (ISO 15765-4) with bitwise arbitration and the ISO 15765-2 transport protocol; the K-Line protocol (ISO 9141-2, ISO 14230-4) with initialization procedures (5-baud init, Fast Init), timing parameters, and KWP2000 message structure. A comparative analysis of the protocols by key characteristics is provided.

The hardware of the adapter has been developed based on a two-domain architecture with galvanic isolation: the USB domain (STM32F411RCTx microcontroller, USB 2.0 Full Speed, AMS1117-3.3 regulator) and the AUTO domain (isolated CAN transceiver ISO1050DUB, K-Line driver L9637D). The selection of seven key components is justified. Six functional circuit nodes are described in detail, including signal levels and circuit design rationale.

Mathematical calculations of the circuit were performed (formulas (4.1)–(4.10)): the operating modes of the AMS1117-3.3 regulator (maximum dissipated power 1.456 W at $V_{BAT} = 14.4$ V) and the NXE1S0505MC isolated DC/DC converter (efficiency 80%, load 24%) were calculated; CAN interface timing was verified (ISO1050DUB loop delay 50 ns, Prop_Seg margin 220 ns); K-Line circuit parameters were calculated (ISO 9141-2 compliance confirmed); thermal analysis was performed ($T_J = 118.5$ °C < 125 °C at $T_A = 85$ °C with a 25×25 mm pad); operating limits were determined.

The practical significance of the work lies in developing a hardware solution that eliminates the systemic market deficiency — the absence of galvanic isolation — at an estimated component cost of USD 15–25. The device is recommended for

use in educational institutions, research laboratories, and for the development of custom vehicle diagnostic software.

Keywords: STM32F411RCTx, OBD-II, CAN, K-Line, ISO 15765-4, ISO 9141-2, ISO 14230-4, galvanic isolation, ISO1050DUB, L9637D, USB, vehicle diagnostics, NXE1S0505MC, PCB817, ELM327.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	2
ABSTRACT.....	4
ЗМІСТ.....	1
ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РИНКУ ЗАСОБІВ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	8
1.1 Огляд світового ринку OBD-II обладнання.....	8
1.1.1 Обсяг ринку, тенденції та ключові гравці.....	8
1.1.2 Класифікація діагностичних пристроїв за призначенням та ціновим сегментом.....	9
1.2 Професійне діагностичне обладнання.....	11
1.2.1 Дилерські сканери (Bosch KTS, Autel MaxiSys, Launch X431).....	11
1.2.2 Мультимарочні сканери для СТО.....	14
1.2.3 Аналіз функціональності та обмежень.....	15
1.3 Споживчі USB та Bluetooth адаптери.....	17
1.3.1 Адаптери на базі ELM327: поширення та обмеження.....	17
1.3.2 Китайські клони ELM327: проблеми якості та несумісності.....	19
1.3.3 Якісні споживчі рішення (OBDLink, Kiwi 3, vLinker).....	21
1.4 Апаратні платформи для власної розробки OBD-II адаптерів.....	25
1.4.1 Готові модулі на базі ELM327 та STN1170.....	25
1.4.2 Рішення на базі мікроконтролерів (STM32, ESP32, RP2040).....	26
1.4.3 Відкриті проекти (CANable, STM32 OBD adapters на GitHub).....	29
1.5 Порівняльна таблиця існуючих рішень.....	30
1.5.1 Критерії порівняння.....	30
1.5.2 Зведена порівняльна таблиця та висновки.....	31
1.6 Обґрунтування необхідності власної розробки.....	32
1.6.1 Виявлені недоліки існуючих рішень.....	33
1.6.2 Технічне завдання на розробку адаптера.....	34
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДІАГНОСТИЧНИХ ПРОТОКОЛІВ OBD-II.....	37
2.1 Стандарт OBD-II: історія виникнення та сфера застосування.....	37
2.2 Протокол CAN (ISO 15765-4).....	40
2.2.1 Фізичний рівень CAN та структура фрейму.....	40
2.2.2 ISO 15765-4: специфікація CAN для OBD-II.....	43

2.2.3	Діагностичні сервіси UDS поверх CAN.....	45
2.3	Протокол K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP2000).....	48
2.3.1	Фізичний рівень та електричні характеристики K-Line.....	48
2.3.2	Процедура ініціалізації ISO 9141-2 та тайм-аути.....	50
2.3.3	Структура повідомлень KWP2000 (ISO 14230).....	52
2.4	Порівняльний аналіз протоколів CAN та K-Line та їх застосування у сучасних автомобілях.....	54
3.1	Загальна архітектура пристрою та структурна схема.....	58
3.2	Вибір та обґрунтування компонентів схеми.....	59
3.2.1	Мікроконтролер DD1 (STM32F411RCTx).....	59
3.2.2	Ізольований CAN-трансивер DD2 (ISO1050DUB).....	60
3.2.3	Драйвер K-Line DA6 (L9637D).....	60
3.2.4	Ізольований DC/DC перетворювач DD3 (NXE1S0505MC).....	61
3.2.5	Захист USB DD4 (USBLC6-2SC6) та стабілізатор DA5 (AMS1117-3.3).....	62
3.3	Детальний опис схеми електричної принципової.....	68
3.3.1	Вузол живлення від OBD-II (+12 В).....	68
3.3.2	Вузол живлення від USB (+5 В) та логіка вибору джерела.....	69
3.3.3	Ізольована шина живлення +5V_ISO.....	69
3.3.4	Вузол CAN: трансивер та ізолятор.....	70
3.3.5	Вузол K-Line: оптронна розв'язка та драйвер.....	71
3.3.6	Вузол USB: роз'єм, кварц, індикація та скидання.....	72
РОЗДІЛ 4	МАТЕМАТИЧНІ РОЗРАХУНКИ СХЕМИ.....	75
4.1	Розрахунок ланцюга живлення.....	75
4.1.1	Стабілізатор DA5 (AMS1117-3.3).....	75
4.1.2	DC/DC перетворювач DD3 (NXE1S0505MC).....	75
4.1.3	Фільтруючі конденсатори.....	76
4.2	Розрахунок CAN-інтерфейсу.....	76
4.2.1	Навантажувальний резистор шини CAN.....	76
4.2.2	Затримки ISO1050DUB та максимальна швидкість.....	77
4.2.3	Завадостійкість.....	77
4.3	Розрахунок K-Line інтерфейсу.....	77
4.3.1	Резистори оптронної розв'язки V7/V8.....	77
4.3.2	Ключ VT1 (2N7002).....	78
4.3.3	Часові параметри K-Line (ISO 9141-2).....	78
4.4	Захист USB та тепловий баланс.....	79

4.4.1 ESD-захист DD4 (USBLC6-2SC6).....	79
4.4.2 Загальний тепловий баланс та граничні умови.....	79
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

ВСТУП

Автомобільна електроніка є одним із найбільш динамічно розвинутих напрямів сучасної прикладної електротехніки. Починаючи з 1980-х років, коли перші електронні блоки керування (ЕБУ) з'явилися у серійних автомобілях, складність бортових електронних систем зростала експоненційно. Сучасний легковий автомобіль містить від 50 до 150 окремих мікропроцесорних блоків керування, що взаємодіють між собою через мережі передачі даних — переважно шини CAN (Controller Area Network), LIN та, у найновіших моделях, Automotive Ethernet. Сукупна довжина проводки та кількість електричних з'єднань у таких системах складає сотні метрів і десятки тисяч точок контакту.

Ускладнення бортових систем поставило нові вимоги до інструментів технічного обслуговування та діагностики. Якщо у 1980-х роках механік міг діагностувати більшість несправностей мультиметром та осцилографом, то сьогодні доступ до діагностичної інформації потребує спеціалізованого обладнання — пристроїв, здатних взаємодіяти з протоколами автомобільних мереж. Стандарт OBD-II (On-Board Diagnostics, версія II), запроваджений у США з 1996 року та в Євросоюзі з 2001 року, зобов'язав виробників забезпечити стандартизований доступ до базових діагностичних параметрів через уніфікований 16-контактний роз'єм. Це відкрило ринок для сотень

виробників діагностичного обладнання — від найпростіших кодочитачів вартістю кілька доларів до комплексних дилерських сканерів за тисячі євро.

Попри широкий асортимент комерційного діагностичного обладнання, існуючі рішення мають ряд суттєвих обмежень для дослідницьких та інженерних застосувань. Насамперед — це відсутність гальванічної ізоляції між роз'ємом OBD-II та інтерфейсом підключення до комп'ютера у будь-яких доступних пристроях, включаючи професійне обладнання. Така ізоляція є критично важливою при підключенні лабораторного та вимірювального обладнання — осцилографів, аналізаторів, ноутбуків з мережевим живленням. По-друге, комерційне обладнання є закритим: виробники не надають вихідного коду прошивки та схемотехнічної документації, що унеможливорює адаптацію до нестандартних завдань — роботи з прототипами транспортних засобів, реалізації власних діагностичних протоколів. По-третє, якісне споживче обладнання будується на AT-інтерпретаторах (мікросхема ELM327 або аналоги), що принципово обмежують швидкодію та гнучкість взаємодії з шиною CAN.

Актуальність теми дипломної роботи обумовлена потребою у відкритому апаратному рішенні, що поєднує: підтримку двох ключових автомобільних діагностичних протоколів — CAN (ISO 15765-4) та K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4); повну гальванічну ізоляцію між бортовою мережею автомобіля та інтерфейсом USB; відкриту апаратну архітектуру зі схемотехнічною документацією; конкурентоспроможну собівартість компонентів.

Метою дипломної роботи є розробка та проектування USB-адаптера для діагностики автомобіля на базі мікроконтролера STM32F411RCTx із

підтримкою протоколів CAN та K-Line та повною гальванічною ізоляцією між автомобільною шиною та інтерфейсом USB.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз ринку засобів автомобільної діагностики та виявити недоліки існуючих рішень; вивчити теоретичні основи діагностичних протоколів OBD-II — CAN (ISO 15765-4) та K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4); розробити апаратну архітектуру адаптера з гальванічною ізоляцією між доменами; обґрунтувати вибір кожного ключового компонента схеми; детально описати принципову електричну схему пристрою; виконати математичні розрахунки для верифікації коректності схемотехнічних рішень та визначення граничних умов експлуатації.

Об'єктом дослідження є система бездротового та провідного доступу до бортових діагностичних мереж автомобіля. Предметом дослідження є апаратна архітектура та схемотехнічні рішення USB-адаптера діагностики автомобіля з гальванічною ізоляцією.

Методи дослідження: аналіз технічної документації (datasheet) компонентів; порівняльний аналіз існуючих рішень за системою критеріїв; інженерний розрахунок електричних кіл на основі законів Кірхгофа, теорії лінійних електричних кіл та теплових моделей; аналіз відповідності результатів вимогам стандартів ISO 9141-2, ISO 14230-4, ISO 15765-4, IEC 61000-4-2.

Практичне значення роботи полягає у розробці апаратного рішення, що може бути використане як основа для побудови відкритого інструменту автомобільної діагностики, придатного для наукових досліджень, навчального процесу та розробки власного діагностичного програмного

забезпечення. Наявність повної гальванічної ізоляції робить пристрій безпечним для підключення до дорогого вимірювального обладнання.

Структура дипломної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку скорочень, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи — 70 сторінок основного тексту, 9 таблиць сторінок ілюстративного матеріалу, 15 рисунків, 1 додаток (схема електрична принципова) та список з 15 бібліографічних джерел.

У першому розділі проведено детальний аналіз ринку засобів автомобільної діагностики: розглянуто три сегменти — професійне обладнання (Bosch KTS, Autel MaxiSys, Launch X431), споживчі адаптери (клони ELM327, OBDLink, Kiwi 3, vLinker) та платформи для власних розробок (CANable, STN1170). Виявлено системний недолік ринку — відсутність гальванічної ізоляції у всіх доступних рішеннях. Сформульовано технічне завдання на розробку.

У другому розділі викладено теоретичні основи протоколів OBD-II: детально розглянуто фізичний рівень та структуру кадрів CAN (ISO 15765-4), включаючи механізм побітового арбітражу та транспортний протокол ISO 15765-2; описано протокол K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP2000) з процедурами ініціалізації та часовими параметрами; наведено огляд UDS-сервісів (ISO 14229).

У третьому розділі розроблено апаратну частину адаптера: визначено архітектуру з двома гальванічно ізольованими доменами; обґрунтовано вибір семи ключових компонентів; детально описано шість функціональних вузлів принципової схеми — живлення від OBD-II, живлення від USB, ізольована шина +5V_ISO, вузол CAN, вузол K-Line та вузол USB з індикацією.

У четвертому розділі виконано математичні розрахунки схеми: розраховано режими роботи стабілізатора AMS1117-3.3 та DC/DC перетворювача NXE1S0505MC; верифіковано часові параметри CAN-інтерфейсу (затримки ISO1050DUB, завадостійкість); розраховано параметри ланцюга K-Line (резистори, часові параметри відповідно до ISO 9141-2); виконано тепловий аналіз та визначено граничні умови експлуатації.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РИНКУ ЗАСОБІВ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ

1.1 Огляд світового ринку OBD-II обладнання

1.1.1 Обсяг ринку, тенденції та ключові гравці

Ринок засобів автомобільної діагностики є одним із найбільш динамічних сегментів ринку автомобільної електроніки та є невід'ємною частиною глобальної інфраструктури технічного обслуговування транспортних засобів. Починаючи з 1990-х років, коли бортові діагностичні системи стали обов'язковими для нових автомобілів, ринок пройшов шлях від простих кодочитачів до складних програмно-апаратних комплексів, здатних взаємодіяти з десятками електронних блоків керування одного автомобіля.

За оцінками аналітичного агентства Grand View Research, глобальний ринок автомобільного діагностичного обладнання оцінювався у 2023 році приблизно в 41,5 млрд доларів США. Прогнозований середньорічний темп зростання (CAGR) до 2030 року становить близько 7,2%, що свідчить про стабільний попит та технологічний розвиток галузі. Серед основних рушіїв зростання виділяють: збільшення глобального парку автомобілів (станом на 2024 рік — понад 1,5 млрд одиниць), ускладнення електронних систем (сучасний автомобіль може мати від 50 до 150 окремих ЕБУ), посилення регуляторних вимог до екологічного контролю та технічного огляду, а також зростання попиту на превентивне технічне обслуговування (predictive maintenance).

Важливою тенденцією є зміщення ринку у бік програмно-апаратних рішень та хмарних платформ. Якщо раніше основна цінність діагностичного обладнання полягала у специфічному апаратному забезпеченні, то сьогодні

дедалі більшої ваги набувають бази діагностичних даних, алгоритми аналізу несправностей та можливості віддаленої діагностики. Провідні виробники активно розвивають підписні моделі доступу до актуальних баз даних несправностей та технічних бюлетенів.

Іншою важливою тенденцією є демократизація доступу до діагностичних можливостей. Завдяки появі смартфонів та планшетів як універсальних платформ для відображення даних, роль апаратного адаптера звелась до функції протокового шлюзу між автомобільною шиною та стандартним інтерфейсом (USB, Bluetooth, Wi-Fi). Це відкрило ринок для сотень виробників недорогих адаптерів, переважно китайського походження, і одночасно породило серйозні проблеми якості та сумісності.

Серед ключових виробників світового ринку можна виділити декілька основних груп. У сегменті професійного обладнання абсолютно домінують Robert Bosch GmbH (Німеччина) з лінійкою KTS, Snap-on Incorporated (США) з пристроями SOLUS та ZEUS, Autel Intelligent Technology Corp. (КНР/США) із серіями MaxiSys та MaxiDAS, а також Launch Tech Co. (КНР) з платформою X431. У середньому сегменті помітні позиції займають Innova Electronics (США), Foxwell Technology (КНР), Thinkcar Tech (КНР). У нижньому сегменті домінують безліч ODM-виробників, що випускають адаптери на базі мікросхеми ELM327 або її клонів, а також кілька компаній, що пропонують якісніші альтернативи — OBDLink (ScanTool.net, США), vGate (КНР), PLX Devices (США).

1.1.2 Класифікація діагностичних пристроїв за призначенням та ціновим сегментом

Різноманіття засобів OBD-II діагностики вимагає чіткої систематизації для коректного позиціонування розроблюваного пристрою на ринку. Класифікацію доцільно проводити за декількома незалежними ознаками: функціональним призначенням, способом підключення до зовнішнього обладнання, рівнем підтримуваних протоколів та ціновим сегментом.

За функціональним призначенням усі OBD-II засоби поділяються на: кодочитачі (code readers) — найпростіші пристрої, що лише зчитують та скидають коди несправностей (DTC); сканери (scan tools) — пристрої з розширеними можливостями перегляду потоку даних реального часу (live data), виконання активних тестів та перевірки підсистем; програматори та адаптери J2534 — пристрої для перепрограмування ЕБУ з використанням оригінального ПЗ виробника; а також спеціалізовані засоби — осцилографи, аналізатори шин CAN/LIN, зондувальне обладнання.

За способом підключення до зовнішнього обладнання розрізняють: автономні сканери зі вбудованим дисплеєм та інтерфейсом; USB-адаптери, що потребують підключення до ПК або ноутбука; Bluetooth-адаптери (BT Classic або BLE) для роботи зі смартфонами та планшетами; Wi-Fi-адаптери, що підтримують одночасне підключення декількох клієнтів.

Таблиця 1.1 — Класифікація OBD-II діагностичних пристроїв за сегментами

Сегмент	Ціна (USD)	Призначення	Приклади	Протоколи
Нижній	3–20	Масовий споживач	Клони ELM327	Базові OBD-II
Середній споживчий	20–150	Автоентузіасти	OBDLink LX, vLinker FS	OBD-II + деякі вир.

Сегмент	Ціна (USD)	Призначення	Приклади	Протоколи
Напівпрофесійний	150–500	Незалежні СТО	Foxwell NT710, Autel AL619	OBD-II + ABS/SRS/T PMS
Професійний	500–5000+	Дилери, великі СТО	Bosch KTS, Autel MaxiSys	Повний спектр + програмування

Розроблюваний в рамках даної дипломної роботи USB-адаптер на базі STM32 позиціонується між середнім споживчим та напівпрофесійним сегментами за функціональністю, проте відрізняється від існуючих рішень наявністю повноцінної гальванічної ізоляції, відкритою архітектурою та підтримкою двох ключових протоколів — CAN та K-Line — в одному пристрої.

1.2 Професійне діагностичне обладнання

1.2.1 Дилерські сканери (Bosch KTS, Autel MaxiSys, Launch X431)

Професійне діагностичне обладнання верхнього класу є основним інструментом авторизованих дилерів та великих незалежних СТО. Такі пристрої відрізняються підтримкою повного спектру виробничих діагностичних протоколів, можливістю програмування та кодування блоків керування (ЕБУ), регулярною актуалізацією баз даних через інтернет і, як правило, побудовані на Android або Windows-платформі з великим сенсорним дисплеєм. Підключення до автомобіля здійснюється через універсальний VCI (Vehicle Communication Interface) — проміжний апаратний модуль.



Рисунок 1.1 — Діагностичний сканер Bosch KTS 560 — представник дилерського класу

Bosch KTS (серії 200, 340, 560, 650) — одна з найавторитетніших ліній професійних сканерів на європейському ринку. Пристрої підтримують усі стандартизовані протоколи OBD-II (ISO 9141-2, ISO 14230, ISO 15765 CAN, SAE J1850), а також виробничі протоколи для автомобілів концернів VAG (VCDS-подібний рівень), BMW, Mercedes-Benz, PSA, Renault, Volvo та інших. Ключовою особливістю є тісна інтеграція з інформаційними системами ESI[tronic] 2.0 — хмарною базою технічних даних, що містить регламентні значення параметрів, осцилограми еталонних сигналів та покрокові інструкції з пошуку несправностей. Це забезпечує контекстну діагностику — сканер не просто показує коди, а пропонує ймовірні причини та порядок перевірки. Вартість комплекту KTS 560 з однорічною підпискою ESI[tronic] становить близько 3500–5000 євро.

З технічної точки зору VCI-модуль Bosch (FSA 500/550/750) є двоканальним осцилографом і водночас протокольним шлюзом. Він підтримує: швидкісний CAN (High-Speed CAN до 1 Мбіт/с), CAN FD (до 5 Мбіт/с у фазі даних), низькошвидкісний CAN (Low-Speed CAN, Single Wire CAN), K-Line та L-Line, LIN (Local Interconnect Network), FlexRay (у деяких версіях), а також вимірювання аналогових сигналів у діапазоні ± 200 В.

Гальванічна ізоляція між автомобільним роз'ємом та USB-портом підключення до ноутбука не задекларована виробником як характеристика, що вказує на її відсутність або використання лише функціональної ізоляції.

Autel MaxiSys (серії MS906, MS908, Ultra, Ultra Lite) — представники китайської компанії Autel, що здобули широке визнання завдяки поєднанню функціональності та відносно доступної ціни (800–3000 доларів). Пристрої побудовані на Android-платформі (Android 7–11 залежно від моделі), мають 9–13-дюймові дисплеї та підтримують понад 80 марок автомобілів на рівні виробничих протоколів. Перелік підтримуваних функцій включає: зчитування/скидання DTC всіх систем, потік живих даних з графіками, активні тести (actuator tests), кодування та адаптації, навчання компонентів (дросельна заслінка, форсунки, сажовий фільтр), скидання сервісних інтервалів, програмування ключів та іммобілайзерів.

Важливою особливістю старших моделей серії MaxiSys є підтримка J2534 Pass-Thru та D-PDU API, що дозволяє використовувати оригінальне програмне забезпечення виробника (наприклад, ODIS для VAG або IDS для Ford) через цей пристрій. Це відкриває доступ до функцій, недоступних через будь-який незалежний сканер. MaxiSys Ultra додатково підтримує CAN FD та DoIP (Diagnostics over IP) — протоколи, що використовуються у найновіших автомобілях з Ethernet-шиною.

Launch X431 (серії Pro, Pro5, Pro Elite, PadVII) — ще один великий китайський виробник, що займає значну частку ринку переважно в Азії та Східній Європі. Відмінністю є модульна архітектура: основний Android-планшет може використовуватись із різними комунікаційними адаптерами залежно від марки автомобіля (DBScar, Smartlink). Підтримується більш як 100 марок, функціонал подібний до Autel MaxiSys, однак якість

програмного забезпечення та бази даних іноді поступається конкурентам на думку незалежних фахівців. Перевагою є нижча ціна (400–1500 доларів) та широка мережа партнерів в Україні.



Рисунок 1.2 — Сканери Autel MaxiSys MS906 (ліворуч) та Launch X431 Creader Elite (праворуч)

1.2.2 Мультимарочні сканери для СТО

Окрему нішу займають мультимарочні сканери середнього класу, орієнтовані на незалежні СТО, що обслуговують широкий спектр автомобілів, але не мають потреби у повному наборі дилерських функцій. Ця категорія є найбільш численною та різноманітною на ринку.

Характерним представником є лінійка Foxwell NT (710, 809, 910Pro). Пристрої мають власний 7–8-дюймовий дисплей, підтримують усі стандартні OBD-II режими та розширені функції для конкретних систем (ABS, подушки безпеки SRS, TPMS, паркувальна система, кондиціонер). NT910Pro додатково вміє виконувати базові функції адаптації: скидання масляного ресурсу,

калібрування датчика кута повороту керма, відкалібрування стояночного гальма. Вартість — 180–400 доларів.

Thinkcar Pro та Thinktool Pro є прикладом Android-планшетів з вбудованим VCI-модулем. Відкрита Android-платформа дозволяє встановлювати додаткові застосунки, що є перевагою над закритими системами. Підтримка понад 60 марок, функціонал схожий на Foxwell NT.

Innova 7111 та 9600 (виробник Innova Electronics, США) орієнтовані на американський ринок і мають розширену підтримку специфічних протоколів Ford, GM, Chrysler. Особливістю є вбудована база даних RepairSolutions2, що пропонує найбільш вірогідні причини конкретних кодів несправностей на основі реальної статистики ремонтів.

1.2.3 Аналіз функціональності та обмежень

Незважаючи на широкі можливості розглянутого обладнання, воно має ряд суттєвих обмежень, що обумовлюють актуальність розробки власних рішень.

По-перше, закритість апаратної та програмної архітектури. Жоден з розглянутих комерційних сканерів не надає доступу до вихідного коду прошивки VCI-модуля чи схемотехнічної документації. Це унеможливорює розробку власних протокольних розширень або інтеграцію з нестандартними системами, що критично важливо для дослідницьких та освітніх проектів.

По-друге, відсутність повноцінної гальванічної ізоляції. Жоден з розглянутих пристроїв — ні Bosch KTS, ні Autel MaxiSys, ні Launch X431 — не декларує повну гальванічну ізоляцію між OBD-II роз'ємом і USB-портом

на рівні, що відповідає стандарту IEC 61010 чи аналогічному. Це означає, що несправності в бортовій мережі (перенапруга, індуктивні викиди під час запуску стартера) можуть безпосередньо впливати на підключений ноутбук або лабораторне обладнання.

По-третє, висока вартість. Навіть найбюджетніше рішення мультимарочного класу (Foxwell NT710) коштує близько 180 доларів, тоді як повноцінний дилерський сканер — від 2000 доларів. Для навчальних закладів, дослідницьких груп та індивідуальних розробників це є суттєвим бар'єром.

По-четверте, орієнтація виключно на діагностику серійних автомобілів. Усі розглянуті пристрої розраховані на роботу з базою даних відомих автомобілів. Вони не придатні для роботи з прототипами, нестандартними CAN-мережами або власними пристроями, що використовують OBD-II роз'єм як зручний конектор.

Таблиця 1.2 — Порівняння ключових характеристик провідних професійних сканерів

Характеристика	Bosch KTS 560	Autel MaxiSys Ultra	Launch X431 Pro5
Ціна	~4500 EUR	~2800 USD	~1200 USD
Платформа	Windows + Android	Android 9	Android 9
CAN FD	Так	Так	Так (деякі авто)
K-Line	Так	Так	Так
DoIP (Ethernet)	Частково	Так	Ні
J2534 Pass-Thru	Так	Так	Так

Характеристика	Bosch KTS 560	Autel MaxiSys Ultra	Launch X431 Pro5
Гальванічна ізоляція	Не задекларована	Не задекларована	Не задекларована
Відкрита архітектура	Ні	Ні	Ні

1.3 Споживчі USB та Bluetooth адаптери

1.3.1 Адаптери на базі ELM327: поширення та обмеження

Мікросхема ELM327, розроблена канадською компанією ELM Electronics у 2005 році, стала де-факто стандартом для масового ринку OBD-II адаптерів. Вона реалізує інтерпретатор AT-команд (Hayes-подібний набір команд), що дозволяє керувати нею через простий текстовий інтерфейс по UART. Поверх UART будуються різні транспортні інтерфейси: USB (через мікросхему USB-UART, найчастіше CP2102, CH340 або FTDI FT232), Bluetooth (модуль HC-05 або HC-06), Wi-Fi (модуль ESP8266 або аналог).

Мікросхема ELM327 реалізує апаратну підтримку п'яти протоколів OBD-II: ISO 9141-2 (K-Line, 10,4 кбод), ISO 14230-4 KWP2000 Fast (K-Line), ISO 14230-4 KWP2000 Slow (K-Line 5 бод ініціалізація), ISO 15765-4 CAN (11/29-бітний ідентифікатор, 250/500 кбод), SAE J1850 PWM та SAE J1850 VPW (переважно Ford та GM до 2008 року). Автоматичне визначення протоколу (команда ATSP 0) є однією з ключових зручних функцій.



Рисунок 1.3 — Bluetooth-адаптер ELM327 mini: зовнішній вигляд та внутрішня плата

Принцип роботи адаптера на ELM327 є таким: хост-комп'ютер або смартфон надсилає AT-команди (наприклад, «ATZ» — скидання, «ATSP6» — вибір протоколу ISO 15765-4 CAN 500 кбод з 11-бітним ідентифікатором, «0100» — OBD-II запит підтримуваних PID) по UART/USB/Bluetooth. ELM327 транслює ці запити у відповідний протокол автомобільної шини, отримує відповідь від ЕБУ та повертає її хосту у вигляді ASCII-рядка з hex-значеннями. Хост-додаток декодує ці значення та відображає фізичні параметри (наприклад, «41 0C 1A F8» → частота обертання колінчастого валу $= (0x1A * 256 + 0xF8) / 4 = 1726$ об/хв).

Незважаючи на зручність та простоту, оригінальна мікросхема ELM327 має ряд суттєвих технічних обмежень. По-перше, швидкодія інтерпретатора AT-команд обмежена: на кожен запит витрачається близько 50–200 мс на обробку та форматування відповіді, що обмежує реальну частоту оновлення параметрів до 2–5 Гц (2–5 запитів на секунду для одного PID). Для моніторингу двигуна під навантаженням або аналізу перехідних процесів

цього недостатньо — необхідна частота щонайменше 10–20 Гц. По-друге, ELM327 не підтримує «сирий» доступ до шини CAN (raw CAN mode) у стандартних версіях, що унеможливлює роботу з нестандартними повідомленнями. По-третє, відсутня підтримка нових специфікацій — CAN FD (CAN with Flexible Data-Rate), UDS (Unified Diagnostic Services) на рівні, достатньому для програмування ЕБУ. По-четверте, оригінальна мікросхема ELM327 більше не виробляється компанією ELM Electronics, і переважна більшість «ELM327» на ринку є клонами, що декларують сумісність, але мають обмежений функціонал.

1.3.2 Китайські клони ELM327: проблеми якості та несумісності

Масштаб поширення підроблених та неповноцінних клонів ELM327 є однією з найбільших проблем ринку споживчих OBD-II адаптерів. За різними оцінками, понад 90% адаптерів, що реалізуються за ціною до 15 доларів, містять не оригінальний чіп ELM327, а його клони або функціонально обмежені замінники.

Найпоширенішими є два типи клонів. Перший тип — PIC-based клони: побудовані на мікроконтролерах PIC18F2455 або PIC18F2550 з прошивкою, що імітує набір AT-команд ELM327. Якість реалізації дуже варіюється від виробника до виробника. Деякі досить точно відтворюють поведінку оригіналу для базових операцій, інші мають суттєві відхилення у тайм-аутах та форматуванні відповідей. Другий тип — так звані «25K80» або «v1.5 fake»: ці клони видають себе за ELM327 v1.5, однак реалізують лише базовий набір команд (ATZ, ATSP, стандартні OBD-II PID) і часто некоректно обробляють нестандартні запити.

Спільнота розробників відкритого ПЗ (зокрема проект OpenDiag та форуми ScanTool.net) задокументувала цілий ряд конкретних несумісностей клонів ELM327. Команда AT RV (вимірювання напруги живлення) нерідко повертає некоректні значення або не підтримується взагалі. Команди ATSAF, ATSEA (керування форматуванням CAN-відповідей) ігноруються або виконуються некоректно. Автоматичне визначення протоколу (ATSP 0) спрацьовує некоректно для ряду автомобілів — особливо тих, що підтримують одразу декілька протоколів (наприклад, CAN та K-Line для різних систем). Тайм-аути (ATST — set timeout) не витримуються або ігноруються, що призводить до зависань при роботі з повільними ЕБУ.



Рисунок 1.4 — Бюджетний OBD-II адаптер ELM327 (ліворуч) та OBDLink MX+ (праворуч)

Схемотехнічні рішення клонів також викликають серйозні питання щодо безпеки. Аналіз типової схеми дешевого Bluetooth-клону виявляє: відсутність будь-якого захисту від перенапруги на лініях K-Line та CAN (немає TVS-діодів чи обмежувачів струму); відсутність гальванічної ізоляції між OBD-II роз'ємом та Bluetooth-модулем; використання нерегульованого

живлення безпосередньо від PIN 16 роз'єму OBD-II (+12 В) без фільтрації та захисту від зворотної полярності; мінімальні фільтруючі конденсатори (або їх повна відсутність) на лініях живлення мікроконтролера. За таких умов несправність у бортовій мережі автомобіля (наприклад, перехідний сплеск напруги понад 60 В під час відключення акумулятора) може призвести до виходу з ладу адаптера, а при Bluetooth-підключенні — до ушкодження смартфона.

Окрему проблему становить підроблення версій прошивки. Практично всі дешеві клони декларують версію ELM327 v2.1 або v1.5, тоді як реально реалізований набір команд відповідає в кращому разі v1.0. Це вводить в оману користувачів та розробників ПЗ, що розраховують на певний рівень сумісності.

1.3.3 Якісні споживчі рішення (OBDLink, Kiwi 3, vLinker)

На противагу масовому сегменту підробок, ряд компаній пропонує якісні споживчі рішення з офіційною технічною документацією, гарантованою сумісністю та реальною підтримкою розробників.

OBDLink MX+ та OBDLink EX (виробник ScanTool.net, США) є найбільш функціональними адаптерами споживчого класу на ринку. Обидва побудовані на власній мікросхемі STN2120, яка є розвитком концепції ELM327 з усуненням більшості обмежень. STN2120 підтримує усі стандартні OBD-II протоколи плюс «сирий» CAN-доступ (команди STPX, STFSP), розширені команди моніторингу шини, налаштовувані фільтри CAN-повідомлень. MX+ підключається через Bluetooth 4.0 (BLE) та класичний Bluetooth; EX — через USB. Підтримуються деякі виробничі протоколи для Ford, GM, Chrysler та Toyota. Вартість — 100–140 доларів.

Важливою перевагою є повна сумісність з популярними застосунками (Torque Pro, OBD Fusion, FORScan, AlfaOBD) та наявність публічної документації на набір команд STN.



Рисунок 1.5 — OBDLink MX+ Bluetooth (ліворуч) та OBDLink EX USB (праворуч) від ScanTool.net

Kiwi 3 від PLX Devices (США) пропонує подібний рівень якості з акцентом на швидкодію. Використовується власна мікропрограма, що реалізує конвеєрну обробку запитів — поки попередня відповідь відправляється хосту, наступний запит вже надсилається до ЕБУ. Заявлена частота оновлення даних досягає 60 PID/с для деяких параметрів, що є суттєво вищим за ELM327. Пристрій підключається виключно через Bluetooth та розрахований на роботу з iOS та Android.

vLinker FS (виробник vGate, КНР) є більш доступною альтернативою (40–80 доларів) з підтримкою специфічних протоколів Ford MS CAN (Middle Speed CAN, 125 кбод) та HS CAN (High Speed CAN, 500 кбод) одночасно. Це

є суттєвою перевагою для автомобілів Ford та Lincoln, де різні системи підключені до різних CAN-шин. Пристрій доступний у варіантах USB (vLinker FS USB), Bluetooth (vLinker MC+) та Wi-Fi. Схемотехніка є якіснішою порівняно з клонами ELM327, однак повна технічна документація публічно не доступна.

Попри вищу якість та кращу функціональність, усі розглянуті споживчі рішення мають спільні обмеження. Жоден з цих пристроїв не забезпечує повноцінної гальванічної ізоляції між лініями OBD-II та інтерфейсом підключення до комп'ютера — ізоляція як технічна характеристика взагалі не фігурує у специфікаціях. Архітектура АТ-інтерпретатора (навіть у вдосконаленій версії STN) принципово обмежує можливості роботи з «сирими» CAN-фреймами та реалізації нестандартних сценаріїв. Вихідний код прошивки є закритим, що унеможливлює кастомізацію під специфічні завдання.

Таблиця 1.3 — Порівняння якісних споживчих OBD-II адаптерів

Параметр	OBDLink MX+	Kiwi 3	vLinker FS USB
Чіп	STN2120	Власний	Не задекларовано
Інтерфейс	BT 4.0 / BT Classic	Bluetooth	USB / BT / Wi-Fi
CAN raw доступ	Так (STPX)	Обмежено	Ні
K-Line	Так	Так	Так
MS CAN (125 кбод)	Ні	Ні	Так (Ford)
Макс. частота PID	~30 PID/c	~60 PID/c	~20 PID/c

Параметр	OBDLink MX+	Kiwi 3	vLinker FS USB
Гальванічна ізоляція	Ні	Ні	Ні
Відкрита документація	Часткова (STN)	Ні	Ні
Ціна (USD)	~130	~80	~50

Аналіз наведеної таблиці підкреслює, що жоден з якісних споживчих адаптерів не забезпечує гальванічної ізоляції — функції, критично важливої при роботі з лабораторним та вимірювальним обладнанням. Саме цей недолік, поряд із закритою архітектурою, є одним з головних обґрунтувань для розробки власного рішення на базі мікроконтролера STM32 з ізольованими інтерфейсами CAN та K-Line, що є темою даної дипломної роботи.

1.4 Апаратні платформи для власної розробки OBD-II адаптерів

Поряд із готовими комерційними рішеннями, існує значна категорія апаратних платформ та відкритих проектів, що дозволяють розробникам будувати власні діагностичні адаптери або адаптувати існуючі рішення під специфічні потреби. Цей сегмент особливо цікавий для наукових досліджень, навчальних проектів та розробки нестандартних діагностичних інструментів.

1.4.1 Готові модулі на базі ELM327 та STN1170

Для розробників, що бажають отримати готову протокольну підтримку OBD-II без необхідності реалізовувати її з нуля, існують спеціалізовані мікросхеми та модулі, розраховані на вбудовування у власні пристрої.

Мікросхема STN1110 та її наступник STN1170 від компанії ScanTool.net є найбільш функціональною альтернативою ELM327 у вигляді окремої мікросхеми (корпус SSOP-20). STN1110/1170 є повністю сумісними з набором AT-команд ELM327, але додатково підтримують: монітор шини CAN (STCMM — відображення всього трафіку без фільтрації), програмовані фільтри та маски CAN-повідомлень, передачу довільних CAN-фреймів (STPX), налаштування швидкості CAN (від 33,3 кбод до 1 Мбод), розширені команди для роботи з ISO 15765 (мультифреймові повідомлення). Мікросхема підключається до зовнішнього мікроконтролера або напряму до USB-UART перетворювача. Вартість STN1170 становить близько 8–12 доларів у роздрібній торгівлі.

Перевагою використання STN1170 є відсутність необхідності самостійно реалізовувати складну логіку протоколів OBD-II — вся робота виконується мікросхемою. Недоліком є те, що архітектура AT-інтерпретатора зберігається і принципово обмежує гнучкість роботи з шиною: неможливо,

наприклад, відправляти арбітражні кадри CAN або реалізовувати власні транспортні протоколи поверх CAN. Крім того, схемотехнічна реалізація фізичного рівня (трансивери, ізоляція) повністю покладається на розробника.

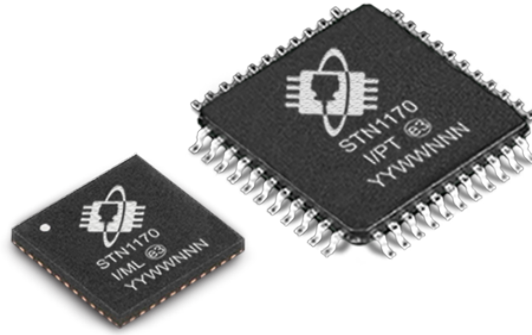


Рисунок 1.6 — Мікросхема STN1170 (OBD-II інтерпретатор) у корпусах QFN-32 та LQFP-48

Альтернативою є використання модулів на базі ELM327 у вигляді готових PCB-модулів (аналог Arduino-шилдів). Такі модулі зазвичай містять мікросхему ELM327 або її клон, мінімальну обв'язку (кварц, конденсатори, стабілізатор живлення) та виводять сигнали UART, K-Line, CAN на штирові роз'єми. Вартість подібних модулів на AliExpress становить 2–5 доларів. Основні проблеми — якість клонованої мікросхеми та повна відсутність захисних компонентів на лініях CAN та K-Line.

1.4.2 Рішення на базі мікроконтролерів (STM32, ESP32, RP2040)

Найбільш гнучким підходом до розробки власного OBD-II адаптера є реалізація всього протокольного стека на мікроконтролері загального призначення. Такий підхід вимагає значно більших зусиль на етапі розробки, але забезпечує повний контроль над поведінкою пристрою та можливість реалізації будь-яких нестандартних функцій.

Сімейство мікроконтролерів STM32 від STMicroelectronics є одним з найпопулярніших вибором для подібних проектів. Ключовою перевагою є наявність апаратного bxCAN-контролера (Basic eXtended CAN) у більшості моделей середнього класу (STM32F1xx, STM32F2xx, STM32F4xx, STM32L4xx), що дозволяє реалізувати повноцінну роботу з шиною CAN без зовнішніх компонентів протокольного рівня — потрібен лише зовнішній трансивер. Апаратний USB Full Speed (12 Мбіт/с) є у більшості моделей STM32F1 та STM32F4. Зокрема, STM32F411RCTx (що використовується у даній роботі) має: ядро ARM Cortex-M4 з FPU на частоті до 100 МГц, 512 КБ Flash та 128 КБ RAM, апаратний USB 2.0 Full Speed, апаратний bxCAN, три апаратних UART/USART (для K-Line та налагодження), SPI, I2C та інші інтерфейси.

ESP32 від Espressif Systems є популярним вибором для проектів з бездротовим зв'язком. Наявність вбудованих Wi-Fi та Bluetooth Low Energy спрощує реалізацію бездротового OBD-II адаптера. Деякі варіанти ESP32 (ESP32-S2, ESP32-S3) мають апаратний USB, однак підтримка CAN реалізована на рівні TWAI (Two-Wire Automotive Interface) — апаратний контролер присутній лише в деяких варіантах. Суттєвим обмеженням є відсутність апаратного USB у базовому ESP32 (перший варіант), а реалізація K-Line ініціалізації (5-бодова послідовність) вимагає точного тайм-інгу, що важко забезпечити на платформі з операційною системою реального часу FreeRTOS.

Raspberry Pi RP2040 є відносно новою платформою (2021 рік) з цікавими характеристиками для подібних задач: два ядра ARM Cortex-M0+ на 133 МГц, унікальна периферія PIO (Programmable I/O) для реалізації довільних протоколів на апаратному рівні, апаратний USB 1.1. Однак

відсутність вбудованого CAN-контролера означає необхідність реалізації протоколу програмно через PIO, що є складнішим рішенням порівняно з апаратним bxCAN STM32.

Таблиця 1.4 — Порівняння мікроконтролерних платформ для розробки OBD-II адаптера

Параметр	STM32F411RCTx	ESP32-S3	RP2040
Ядро / частота	Cortex-M4 / 100 МГц	Xtensa LX7 / 240 МГц	Cortex-M0+ / 133 МГц
Flash / RAM	512 КБ / 128 КБ	8 МБ / 512 КБ	2 МБ / 264 КБ
Апаратний CAN	Так (bxCAN)	Так (TWAI)	Ні (тільки PIO)
Апаратний USB	Так (FS 12 Мбіт/с)	Так (FS 12 Мбіт/с)	Так (1.1, 12 Мбіт/с)
UART (K-Line)	3 апаратних UART	3 UART	2 UART + PIO
Wi-Fi / BT	Ні	Wi-Fi + BT 5.0	Ні (окремий модуль)
Споживання (акт.)	~100 мА при 100 МГц	~240 мА при 240 МГц	~80 мА при 133 МГц
Вартість (USD)	~3–5	~3–6	~1–2

Аналіз таблиці підтверджує, що STM32F411RCTx є оптимальним вибором для даного проекту: поєднання апаратного CAN, USB та трьох UART у одному компактному корпусі (LQFP-64) разом із зрілою екосистемою розробки (STM32CubeIDE, HAL-бібліотеки, обширна документація) робить цей мікроконтролер природним вибором для USB-адаптера з підтримкою CAN та K-Line.

1.4.3 Відкриті проекти (CANable, STM32 OBD adapters на GitHub)

Спільнота розробників відкритого апаратного та програмного забезпечення створила ряд проектів у сфері автомобільної діагностики, що є важливими орієнтирами при проектуванні власних рішень.

CANable є одним з найвідоміших відкритих проектів USB-CAN адаптерів. Розроблений Ерік Пальтен (Eric Parlén) та підтриманий спільнотою, CANable 2.0 побудований на STM32G0B1 та реалізує протокол slcan (Serial Line CAN) або candleLight (SocketCAN-сумісний USB-пристрій). Апаратна схема публічно доступна (KiCad), трансивер SN65HVD230 підключається без ізоляції. CANable не підтримує K-Line, не має гальванічної ізоляції та не орієнтований на OBD-II діагностику — це чистий CAN-аналізатор/шлюз. Тим не менш, проект є цінним прикладом мінімалістичної реалізації USB-CAN інтерфейсу на STM32.

Проект USBtin від Thomas Fischl реалізує аналогічний концепт на AVR-мікроконтролері (ATmega32U4) з CAN-контролером MCP2515. Протокол слідує специфікації LAWICEL CANUSB. Проект також є відкритим, схема доступна, але продуктивність обмежена SPI-інтерфейсом між MCU та MCP2515 (максимальна пропускна здатність близько 100 кадрів/с).

На платформі GitHub існує декілька проектів OBD-II адаптерів на STM32. Проект «STM32-OBD» реалізує базовий K-Line (ISO 9141-2) інтерфейс на STM32F103 з виведенням даних через UART. Проект «openobd» намагається реалізувати повноцінний ELM327-сумісний інтерпретатор на STM32, але на момент аналізу знаходився у стані незавершеної розробки. Спільною рисою більшості знайдених відкритих проектів є відсутність

гальванічної ізоляції та обмеження на один протокол (або тільки CAN, або тільки K-Line).

Таким чином, існуючі відкриті проекти покривають або CAN-аналіз (CANable, USBtin), або базову K-Line діагностику, але жоден з них не поєднує обидва протоколи з повноцінною гальванічною ізоляцією в єдиному пристрої з OBD-II роз'ємом — що є метою даної роботи.

1.5 Порівняльна таблиця існуючих рішень

1.5.1 Критерії порівняння

Для об'єктивного порівняння розглянутих рішень та обґрунтування необхідності власної розробки необхідно сформулювати систему критеріїв, що відображають вимоги до сучасного OBD-II адаптера для дослідницьких та інженерних застосувань.

Перший критерій — підтримка протоколу CAN (ISO 15765-4). Оцінюється не лише факт підтримки, а й рівень доступу: лише стандартні OBD-II PID (базовий рівень), UDS-сесії (розширений рівень) або сирий доступ до шини CAN (повний рівень).

Другий критерій — підтримка K-Line (ISO 9141-2 / ISO 14230 KWP2000). Цей протокол критично важливий для діагностики автомобілів, випущених до 2008 року, а також для доступу до деяких систем у нових автомобілях (наприклад, іммобілайзер у VAG-автомобілях досі використовує K-Line).

Третій критерій — гальванічна ізоляція між OBD-II роз'ємом та USB-інтерфейсом. Є критично важливим при роботі з осцилографами,

вимірювальними картами та ноутбуками, що живляться від мережі 220 В — за відсутності ізоляції можливе утворення петлі заземлення або безпосереднє ушкодження обладнання при несправності в бортовій мережі.

Четвертий критерій — відкритість архітектури (схема, прошивка). Відкрита архітектура дозволяє кастомізувати пристрій під специфічні завдання, вивчати принципи роботи та вносити виправлення.

П'ятий критерій — максимальна швидкість передачі даних (пропускна здатність). Вимірюється у кількості CAN-кадрів або PID-запитів за секунду — визначає придатність пристрою для аналізу динамічних процесів.

Шостий критерій — ціна та доступність. Враховується як кінцева ціна пристрою, так і доступність компонентів для власного виробництва.

1.5.2 Зведена порівняльна таблиця та висновки

Таблиця 1.5 — Зведене порівняння OBD-II діагностичних рішень за ключовими критеріями

Рішення	CAN	K-Line	Відкритість	Пропускна здатність	Ціна
Bosch KTS 560	Повний	Так	Закрите	Висока	~4500 EUR
Autel MaxiSys Ultra	Повний	Так	Закрите	Висока	~2800 USD
Клон ELM327 (BT)	OBD-II PID	Так	Закрите	Низька	3–15 USD
OBDLink MX+	Розшир.	Так	Часткова	Середня	~130 USD

Рішення	CAN	K-Line	Відкритість	Пропускна здатність	Ціна
Kiwi 3	OBD-II PID	Так	Закрите	Середня	~80 USD
vLinker FS USB	OBD-II PID	Так	Закрите	Середня	~50 USD
CANable 2.0	Повний	Ні	Відкрите	Висока	~25–40 USD
STN1170-based DIY	Розшир.	Так	Часткова	Середня	~20–40 USD
Розроблюваний адаптер	Повний	Так	Відкрите	Висока	~15–25 USD*

* — орієнтовна собівартість компонентів без урахування витрат на розробку та виготовлення плати.

Аналіз зведеної таблиці дозволяє зробити декілька важливих висновків. По-перше, жодне з існуючих рішень не поєднує одночасно повну підтримку обох протоколів (CAN та K-Line), повну гальванічну ізоляцію та відкриту архітектуру. Найближчим до бажаного є CANable 2.0, однак він не підтримує K-Line та не має ізоляції. По-друге, гальванічна ізоляція є відсутньою в усьому спектрі розглянутих рішень — від найдешевших клонів до найдорожчого професійного обладнання. Це свідчить про те, що галузь в цілому не приділяє достатньої уваги захисту підключеного обладнання. По-третє, розроблюваний адаптер при орієнтовній собівартості компонентів 15–25 доларів забезпечує функціональність, що в аспекті ізоляції та відкритості перевищує рішення вартістю в сотні та тисячі доларів.

1.6 Обґрунтування необхідності власної розробки

1.6.1 Виявлені недоліки існуючих рішень

На підставі проведеного аналізу ринку можна сформулювати конкретний перелік недоліків існуючих рішень, що обґрунтовують необхідність розробки власного адаптера.

Відсутність гальванічної ізоляції є найбільш критичним недоліком, що пронизує весь ринок OBD-II адаптерів без винятку. Бортова мережа автомобіля є електрично шумним середовищем: стартер при запуску формує індуктивні викиди напруги до 60–80 В (стандарт ISO 7637), система запалювання генерує радіочастотні завади, регулятор генератора спричиняє пульсації напруги. При безпосередньому з'єднанні OBD-II роз'єму з USB-портом комп'ютера всі ці збурення потенційно впливають на підключене обладнання. Для лабораторного використання (підключення осцилографа, вимірювальних карт, дорогих ноутбуків) це є неприйнятним.

Закрита архітектура комерційних рішень унеможлиблює ряд важливих застосувань. Не можна реалізувати власний діагностичний протокол поверх CAN, що необхідно при роботі з прототипами транспортних засобів або нестандартними системами. Неможлива інтеграція з власними системами збору даних без додаткового програмного прошарку. Відсутність доступу до вихідного коду унеможлиблює вивчення реалізації протоколів у навчальних цілях.

Обмежена підтримка протоколів у доступному ціновому діапазоні є також суттєвою проблемою. Адаптери до 150 доларів, як правило, реалізують лише стандартні OBD-II режими (01–09) і не підтримують UDS-сесії (режим 10 і вище), необхідні для розширеної діагностики та програмування. Більшість адаптерів або підтримує CAN з обмеженнями (через

АТ-інтерпретатор), або підтримує K-Line, але не забезпечує рівноцінної якості роботи з обома протоколами одночасно в одному пристрої.

Низька якість та ненадійність масового сегменту також є значною проблемою. Переважна більшість доступних адаптерів містить неоригінальні мікросхеми з непередбачуваною поведінкою, відсутні захисні компоненти, якість пайки та корпусування залишає бажати кращого. Для серйозної дослідницької роботи такі пристрої є ненадійним інструментом.

1.6.2 Технічне завдання на розробку адаптера

На підставі аналізу ринку, виявлених недоліків існуючих рішень та практичних вимог до інструменту для дослідницьких робіт сформульовано технічне завдання на розробку USB-адаптера для діагностики автомобіля.

Основним функціональним призначенням пристрою є забезпечення двостороннього обміну даними між персональним комп'ютером (підключення через USB) та бортовою мережею автомобіля через стандартний 16-контактний роз'єм OBD-II, з підтримкою протоколів CAN (ISO 15765-4) та K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP2000).

Вимоги до апаратної частини включають такі пункти. Мікроконтролер — STM32F411RCTx з ядром ARM Cortex-M4, тактова частота 100 МГц, наявність апаратних периферійних блоків USB, CAN та UART. Інтерфейс з комп'ютером — USB 2.0 Full Speed (12 Мбіт/с), режим CDC Virtual COM Port для сумісності без встановлення специфічних драйверів. CAN-канал — ізольований трансивер ISO1050DUB з гальванічною ізоляцією не менше 2500 В (RMS), підтримка швидкостей 125/250/500/1000 кбод. K-Line канал — драйвер L9637D з гальванічною розв'язкою через оптрон PCB817, підтримка

ISO 9141-2 (10,4 кбод) та ISO 14230-4 (10,4 кбод, Fast Init). Живлення — від бортової мережі автомобіля (+12 В через PIN 16 роз'єму OBD-II) або від USB (+5 В), з автоматичним вибором джерела; ізоване живлення +5V_ISO для трансиверів від вбудованого DC/DC перетворювача NXE1S0505MC. Захист USB — TVS-діод VD1 (NUP2105L), встановлений послідовно з DD4 (USBLC6-2SC6) для захисту від ESD до 8 кВ (IEC 61000-4-2 рівень 4).

Вимоги до гальванічної ізоляції є ключовими для даного проекту. Повна гальванічна ізоляція між стороною OBD-II (бортова мережа автомобіля) та стороною USB (комп'ютер) має забезпечуватись на рівні не менше 1000 В постійної напруги. Ізоляція реалізується окремо для кожного каналу: CAN — через мікросхему ISO1050DUB, K-Line — через оптрон PCB817 та ключ 2N7002, живлення — через DC/DC перетворювач NXE1S0505MC з ізоляцією 1000 В.

Вимоги до програмної частини передбачають реалізацію USB CDC-пристрою (Virtual COM Port) на базі HAL-бібліотек STM32, драйвера CAN-контролера (bxCAN) з підтримкою стандартних та розширених ідентифікаторів, драйвера K-Line (UART з програмно керованою лінією K-Line через GPIO та L9637D), а також протокольного рівня для обробки OBD-II запитів та передачі «сирих» CAN-фреймів.

Конструктивні вимоги включають: форм-фактор, придатний для розміщення у стандартному корпусі OBD-II донгла; роз'єм OBD-II (SAE J1962 Type A, 16-контактний) для підключення до автомобіля; USB Type-B або Micro-USB для підключення до комп'ютера; світлодіодна індикація стану (живлення, активність CAN, активність K-Line, помилка); кнопка апаратного скидання (RESET).

Таким чином, розроблюваний адаптер займає унікальну нішу на ринку: поєднання підтримки двох ключових OBD-II протоколів, повної гальванічної ізоляції та відкритої апаратної архітектури робить його оптимальним інструментом для дослідницьких, навчальних та інженерних застосувань, де недостатність або ненадійність існуючих рішень є очевидною.

Висновок до розділу 1. В результаті аналізу ринку засобів автомобільної діагностики встановлено, що жодне з існуючих рішень не забезпечує оптимального поєднання підтримки протоколів CAN та K-Line, повної гальванічної ізоляції та відкритої архітектури в доступному ціновому діапазоні. Розглянуто три основних сегменти ринку: професійне обладнання (Bosch KTS, Autel MaxiSys, Launch X431), споживчі адаптери (клони ELM327, OBDLink, Kiwi 3, vLinker) та платформи для власних розробок (STN1170, CANable, STM32-проекти). Виявлено, що відсутність гальванічної ізоляції є системним недоліком ринку в цілому. Сформульовано технічне завдання на розробку USB-адаптера на базі STM32F411RCTx з ізольованими каналами CAN (ISO1050DUB) та K-Line (L9637D + PCB817), що є предметом подальших розділів даної роботи.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДІАГНОСТИЧНИХ ПРОТОКОЛІВ OBD-II

2.1 Стандарт OBD-II: історія виникнення та сфера застосування

Стандарт OBD-II (On-Board Diagnostics, друге покоління) є результатом тривалої еволюції систем бортової діагностики автомобілів, що розпочалась ще у 1980-х роках. Розуміння передумов і цілей створення стандарту є необхідною основою для глибокого вивчення його технічної реалізації.

Перше покоління бортової діагностики (OBD-I) з'явилося у США наприкінці 1980-х років як відповідь на запровадження Каліфорнійським агентством з охорони повітряного басейну (CARB) вимог щодо моніторингу компонентів, що впливають на викиди. Проте OBD-I не був стандартизований: кожен виробник використовував власний діагностичний роз'єм, власний протокол та власний набір кодів несправностей. General Motors застосовував роз'єм ALDL (Assembly Line Diagnostic Link) з протоколом на основі імпульсного кодування, Ford — EEC (Electronic Engine Control) з власним форматом, Chrysler, Toyota, BMW — кожен своє. Це означало, що для роботи з автомобілями різних виробників механіку потрібне було окреме обладнання та знання специфіки кожної системи.

Необхідність уніфікації стала очевидною для регуляторів та автосервісної галузі. У 1994 році CARB запровадило обов'язковість OBD-II для всіх нових легкових автомобілів, що продаються у Каліфорнії, починаючи з модельного року 1996. Федеральне агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) поширило цю вимогу на всі 50 штатів. Технічну специфікацію розробила Товариство автомобільних інженерів (SAE) —

стандарти SAE J1962 (роз'єм), SAE J1850 (протоколи), SAE J2012 (коди несправностей) та інші.

Ключовими досягненнями стандартизації OBD-II стали: уніфікований 16-контактний трапецієподібний роз'єм (SAE J1962, Type A для 12 В, Type B для 24 В), розташований у легкодоступному місці в салоні (як правило, під приладовою панеллю зліва від рульової колонки); стандартизований набір обов'язкових параметрів (PID — Parameter IDs), доступних через режим 01; єдина система п'ятисимвольних кодів несправностей (DTC — Diagnostic Trouble Codes) формату P0XXX (двигун), B0XXX (кузов), C0XXX (шасі), U0XXX (мережа); обов'язковий перелік моніторів готовності (readiness monitors) для перевірки ключових систем нейтралізації відпрацьованих газів.

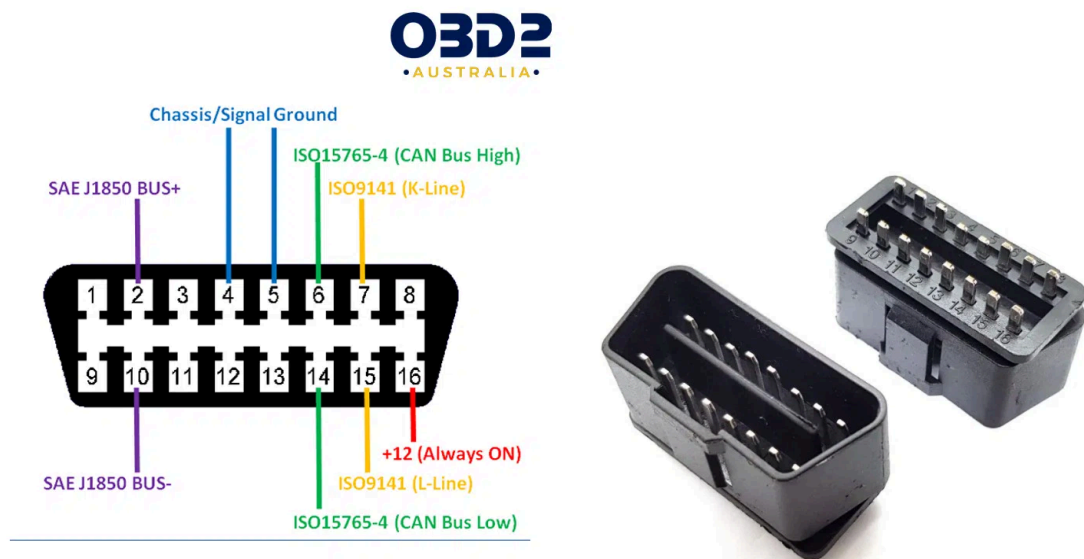


Рисунок 2.1 — Розпіновка 16-контактного роз'єму OBD-II (SAE J1962) та його фізичний вигляд

В Європейському Союзі аналогічна система отримала назву EOBD (European OBD) і стала обов'язковою з 2001 року для бензинових та з 2004

року для дизельних автомобілів відповідно до директиви 98/69/ЕС. Технічна реалізація EOBD ідентична OBD-II, проте набір обов'язкових моніторів дещо відрізняється.

З технічної точки зору OBD-II визначає не один, а п'ять можливих фізичних протоколів передачі даних, що відображає компромісне рішення на момент створення стандарту — кожен з великих виробників наполіг на включенні власного протоколу. Протокол SAE J1850 PWM (Pulse Width Modulation, 41,6 кбод) використовувався переважно Ford. SAE J1850 VPW (Variable Pulse Width, 10,4 кбод) — General Motors. ISO 9141-2 (K-Line, 10,4 кбод) — автомобілі європейських та японських виробників (BMW, Mercedes, Honda, Toyota, Chrysler у певних ринках). ISO 14230-4 KWP2000 (K-Line, 10,4 кбод або Fast Init) — фактично є розвитком ISO 9141-2 з розширеними можливостями. ISO 15765-4 CAN — запроваджений пізніше і став обов'язковим для всіх нових автомобілів у США з 2008 року.

Сьогодні протоколи J1850 PWM та VPW є практично застарілими — автомобілі, що їх використовували, вийшли з масової експлуатації або переведені на CAN. Основними актуальними протоколами є ISO 15765-4 CAN (переважна більшість автомобілів після 2008 року) та ISO 9141-2 / ISO 14230-4 K-Line (автомобілі 1996–2008 років, а також окремі системи нових автомобілів). Саме ці два протоколи є пріоритетними для розроблюваного адаптера.

Таблиця 2.1 — Протоколи фізичного рівня OBD-II та сфера їх застосування

Протокол	Стандарт	Швидкість	Контакти OBD-II	Основні виробники	Статус
SAE J1850 PWM	SAE J1850	41,6 кбод	PIN 2, 10	Ford (США)	Застарілий
SAE J1850 VPW	SAE J1850	10,4 кбод	PIN 2	GM (США)	Застарілий
ISO 9141-2	ISO 9141-2	10,4 кбод	PIN 7, 15	EU, JP виробники	Актуальний (авто до 2008)
ISO 14230-4	ISO 14230	10,4 кбод	PIN 7, 15	EU, JP виробники	Актуальний (авто до 2012)
ISO 15765-4	ISO 15765	250/500 кбод	PIN 6, 14	Всі виробники	Основний (авто після 2008)

2.2 Протокол CAN (ISO 15765-4)

2.2.1 Фізичний рівень CAN та структура фрейму

Протокол CAN (Controller Area Network) був розроблений компанією Robert Bosch GmbH у 1983–1986 роках і первинно орієнтований на застосування в автомобільній електроніці для зменшення кількості проводки між електронними блоками керування. Стандарт ISO 11898 визначає фізичний та канальний рівні CAN, тоді як ISO 15765-4 конкретизує застосування CAN у контексті OBD-II діагностики.

Фізичний рівень CAN базується на диференціальній парі провідників — CANH (CAN High) та CANL (CAN Low). У стані логічної «1» (рецесивний стан) обидва провідники знаходяться на однаковому потенціалі близько 2,5 В.

У стані логічного «0» (домінантний стан) CANH піднімається до рівня приблизно 3,5 В, а CANL опускається до приблизно 1,5 В, забезпечуючи диференційну напругу близько 2 В. Диференційна передача забезпечує високу завадостійкість — синфазні завади (common-mode noise), що однаково впливають на обидва провідники, компенсуються на вході приймача.

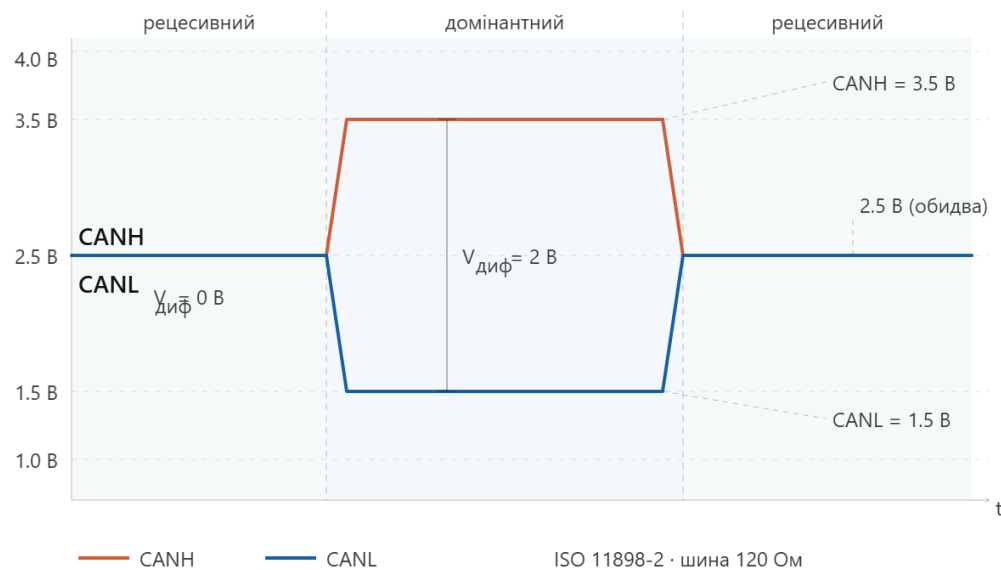


Рисунок 2.2 — Часова діаграма сигналів CANH та CANL: рецесивний (2.5 В) та домінантний стан (CANH=3.5 В, CANL=1.5 В)

Шина CAN є багатоточковою (multipoint bus) — до неї може бути підключено до 32 вузлів (трансиверів) без повторювачів. Для узгодження імпедансу шини на обох кінцях встановлюються термінуючі резистори номіналом 120 Ом. Паралельне включення двох резисторів дає еквівалентний опір 60 Ом, що відповідає хвильовому опору кабельної пари та мінімізує відбиття сигналів. У контексті OBD-II діагностичний адаптер підключається до шини як ще один вузол і не вносить власних термінуючих резисторів — термінація вже присутня в автомобільній шині.

Структура кадру (фрейму) CAN у стандартному форматі (11-бітний ідентифікатор, Base Frame Format) така: поле SOF (Start of Frame) — 1 біт, домінантний; поле арбітражу (Arbitration Field) — 11-бітний ідентифікатор повідомлення + біт RTR (Remote Transmission Request); поле керування (Control Field) — біт IDE (Identifier Extension), зарезервований біт та 4-бітне поле DLC (Data Length Code, кількість байт даних від 0 до 8); поле даних (Data Field) — від 0 до 8 байт корисного навантаження; поле CRC (Cyclic Redundancy Check) — 15-бітна контрольна сума + роздільник; поле підтвердження (ACK Field) — 1 біт ACK + 1 біт роздільника; поле EOF (End of Frame) — 7 рецесивних бітів.

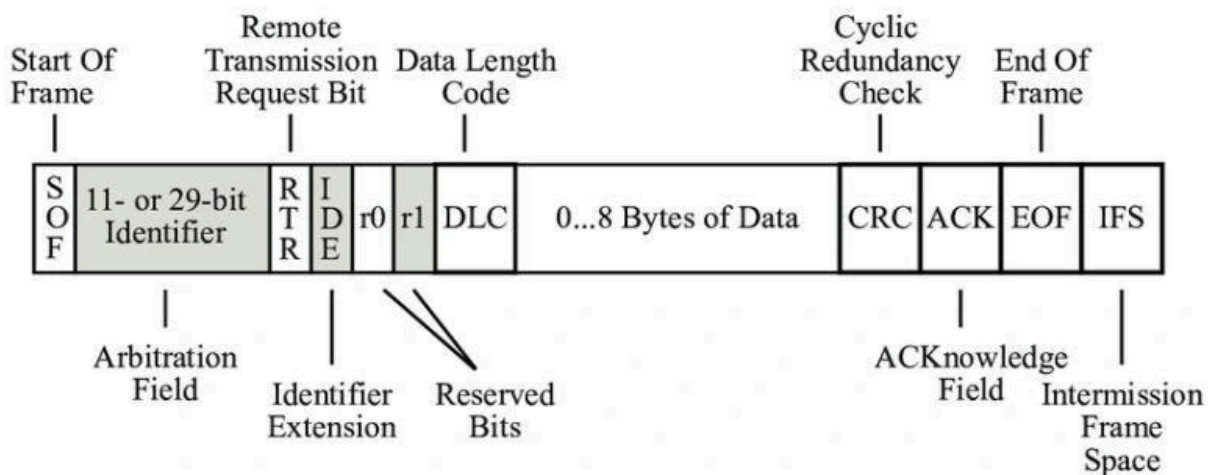


Рисунок 2.3 — Структура стандартного CAN-фрейму (Base Frame Format): поля SOF, Arbitration, Control, Data, CRC, ACK, EOF, IFS

Розширений формат (Extended Frame Format) використовує 29-бітний ідентифікатор — це розширення з'явилося у специфікації CAN 2.0B. У полі арбітражу 11 старших бітів ідентифікатора передаються першими, потім біт SRR (Substitute Remote Request), біт IDE (встановлений у «1» для розширеного формату) та 18 молодших бітів ідентифікатора. Загальна ємність

адресного простору 29-бітного ідентифікатора — понад 536 мільйонів унікальних адрес, що є більш ніж достатнім для будь-якої автомобільної шини.

Механізм арбітражу CAN є одним з найбільш елегантних технічних рішень протоколу. CAN використовує так зване «побітове недеструктивне арбітражування» (bitwise non-destructive arbitration). Коли декілька вузлів одночасно починають передачу, кожен з них порівнює значення що передає зі значенням що читає з шини. Оскільки домінантний стан (логічний «0») завжди перебиває рецесивний (логічна «1»), вузол, що передає «1» але читає «0», розуміє, що інший вузол з нижчим (пріоритетнішим) ідентифікатором вже займає шину — і припиняє передачу без втрати будь-яких даних. Повідомлення з меншим числовим значенням ідентифікатора має вищий пріоритет.

2.2.2 ISO 15765-4: специфікація CAN для OBD-II

ISO 15765-4 «Road vehicles — Diagnostics on Controller Area Networks (CAN) — Part 4: Requirements for emissions-related systems» є спеціалізованим підмножиною стандарту ISO 11898, адаптованим для OBD-II діагностики. Стандарт визначає чотири можливі конфігурації CAN для OBD-II, що відрізняються швидкістю та форматом ідентифікаторів.

Конфігурація 1: ISO 15765-4 CAN (11-бітний ID, 500 кбод) — найпоширеніша конфігурація для легкових автомобілів після 2008 року. Стандартний OBD-II ідентифікатор запиту від сканера до ЕБУ — 0x7DF (функціональний запит до всіх ЕБУ) або 0x7E0–0x7E7 (фізичний запит до конкретного ЕБУ). Відповідь ЕБУ — 0x7E8–0x7EF (0x7E0+8 для першого ЕБУ). Конфігурація 2: ISO 15765-4 CAN (29-бітний ID, 500 кбод) — рідша,

використовується переважно у вантажних автомобілях та автобусах. Конфігурація 3: ISO 15765-4 CAN (11-бітний ID, 250 кбод) — для повільніших мереж. Конфігурація 4: ISO 15765-4 CAN (29-бітний ID, 250 кбод).

Важливим аспектом ISO 15765-4 є визначення мережевого рівня (network layer) — ISO 15765-2, що описує транспортний протокол для передачі повідомлень довжиною більше 8 байт (максимальне корисне навантаження одного CAN-кадру). Цей протокол визначає чотири типи PDU (Protocol Data Unit): одиночний фрейм (SF — Single Frame) для повідомлень до 7 байт; перший фрейм (FF — First Frame) для початку передачі багатофреймового повідомлення, що містить загальну довжину; послідовні фрейми (CF — Consecutive Frames) з нумерацією для відновлення порядку; керуючий фрейм (FC — Flow Control) для управління потоком даних.

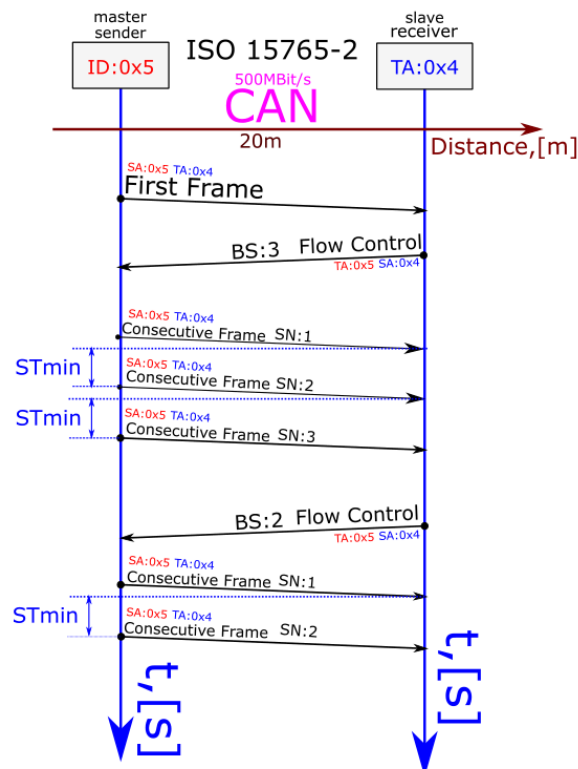


Рисунок 2.4 — Механізм передачі багатобайтових повідомлень за протоколом ISO 15765-2: First Frame, Flow Control, Consecutive Frames

Для розуміння реального обміну даними розглянемо конкретний приклад OBD-II запиту через CAN. Сканер надсилає CAN-фрейм з ID=0x7DF, DLC=8, Data: 02 01 0C 00 00 00 00 00. Тут: 02 — кількість байт, що слідують у запиті (Single Frame, перший байт містить тип PDU та довжину); 01 — режим OBD-II (Mode 01 — поточні дані); 0C — PID запиту (частота обертання колінчастого валу); решта — заповнення нулями до 8 байт. ЕБУ двигуна відповідає фреймом ID=0x7E8, DLC=8, Data: 04 41 0C 1A F8 00 00 00. Тут: 04 — кількість байт відповіді; 41 — режим відповіді (01+40h=41h); 0C — PID; 1A F8 — значення (0x1AF8 = 6904, поділити на 4 = 1726 об/хв).

2.2.3 Діагностичні сервіси UDS поверх CAN

Окрім стандартних OBD-II сервісів (режими 01–09, визначені SAE J1979), протокол ISO 15765 забезпечує транспортний рівень для значно потужнішого стандарту UDS (Unified Diagnostic Services, ISO 14229). UDS є основою для розширеної діагностики та програмування ЕБУ у більшості сучасних автомобілів.

UDS визначає ієрархічну структуру діагностичних сервісів, організованих у сесіях. Стандартна сесія (Default Session, 0x01) доступна завжди і надає доступ до базових функцій читання параметрів. Розширена діагностична сесія (Extended Diagnostic Session, 0x03) дозволяє виконувати активні тести та деякі операції запису. Сесія програмування (Programming Session, 0x02) відкриває доступ до перезапису пам'яті ЕБУ — зазвичай захищена Security Access (криптографічна аутентифікація, сервіс 0x27).

Серед ключових UDS-сервісів, що використовуються при діагностиці: 0x10 DiagnosticSessionControl — перемикання між сесіями; 0x11 ECUReset — скидання ЕБУ (жорстке або програмне); 0x14 ClearDiagnosticInformation — очищення кодів несправностей; 0x19 ReadDTCInformation — читання кодів несправностей з деталізацією (статус, пробіг при виникненні, freeze frame дані); 0x22 ReadDataByIdentifier — читання будь-якого параметра ЕБУ за 2-байтним ідентифікатором (DID); 0x2E WriteDataByIdentifier — запис параметра (кодування); 0x27 SecurityAccess — аутентифікація для захищених операцій; 0x2F InputOutputControlByIdentifier — активні тести (примусове увімкнення/вимкнення актуаторів); 0x34 RequestDownload — початок завантаження прошивки; 0x36 TransferData — передача блоків даних прошивки.

Розроблюваний адаптер на базі STM32 з прямим доступом до шини CAN (через bxCAN та ISO1050DUB) здатний передавати будь-які CAN-фрейми без обмежень АТ-інтерпретатора, що робить його придатним для роботи з UDS-сесіями при відповідній реалізації на стороні хост-комп'ютера. На відміну від ELM327-адаптерів, що обмежують доступ до режимів 01–09, адаптер з прямим CAN-доступом є повноцінним протокольним шлюзом.

Таблиця 2.2 — Основні UDS-сервіси (ISO 14229) та їх застосування

Код сервісу	Назва	Застосування	Захист
0x10	DiagnosticSessionControl	Перемикання сесій	Ні
0x11	ECUReset	Скидання ЕБУ	Залежно від типу

Код сервісу	Назва	Застосування	Захист
0x14	ClearDiagnostic Information	Очищення DTC	Розширена сесія
0x19	ReadDTCInformation	Читання DTC з деталями	Ні
0x22	ReadDataByIdentifier	Читання параметрів (DID)	Ні / залежно від DID
0x2E	WriteDataByIdentifier	Запис / кодування параметрів	Security Access
0x27	SecurityAccess	Аутентифікація	—
0x2F	InputOutputControlByIdentifier	Активні тести актуаторів	Розширена сесія
0x31	RoutineControl	Запуск/зупинка процедур ЕБУ	Залежно від рутини
0x34–0x37	Download/Upload Services	Перепрошивка ЕБУ	Programming + SecAccess

2.3 Протокол K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4 KWP2000)

2.3.1 Фізичний рівень та електричні характеристики K-Line

Протокол K-Line (також відомий як ISO 9141) отримав свою назву від назви сигнальної лінії — K-Line (Keyword Line). Розроблений на початку 1990-х років як компроміс між функціональністю та простотою реалізації, K-Line став основним діагностичним протоколом для автомобілів європейських та японських виробників у період 1996–2008 років. До сьогодні він залишається актуальним для діагностики автомобілів того покоління, яких на дорогах України та Європи залишається дуже багато.

Фізичний рівень K-Line побудований за принципом однопровідної шини з відкритим колектором та пасивним підтягуванням до напруги бортової мережі. На відміну від CAN, де використовується диференційна пара CANH/CANL, K-Line є асиметричним (single-ended) інтерфейсом: передача даних відбувається по одному провіднику (PIN 7 роз'єму OBD-II) відносно корпусу автомобіля (GND). Опціонально може використовуватись лінія L-Line (PIN 15) — вона задіяна лише під час ініціалізації у деяких реалізаціях протоколу та ігнорується в більшості сучасних діагностичних пристроїв.

Електричні рівні K-Line визначені стандартом ISO 9141-2 наступним чином. Рецесивний стан (логічна «1», лінія не зайнята): напруга K-Line підтягується до рівня VBAT (близько +12 В) через підтягуючий резистор 510 Ом–1 кОм. Пороговий рівень логічної «1» для приймача: $V_{\text{rec}} > 0,6 \times V_{\text{BAT}}$ (тобто $> 7,2$ В при $V_{\text{BAT}} = 12$ В). Домінантний стан (логічний «0», передача активного рівня): ключовий транзистор (відкритий колектор або відкритий дрейн) притягує K-Line до рівня менше 1,0–1,5 В. Пороговий рівень логічного «0» для приймача: $V_{\text{dom}} < 0,2 \times V_{\text{BAT}}$ (тобто $< 2,4$ В при $V_{\text{BAT}} =$

12 В). Таким чином, K-Line є сигналом з логікою «негативний» відносно стандартного TTL: «1» — висока напруга (~12 В), «0» — низька (~0 В), але в контексті UART ці рівні відповідають стандартному UART (IDLE = «1», START bit = «0»).

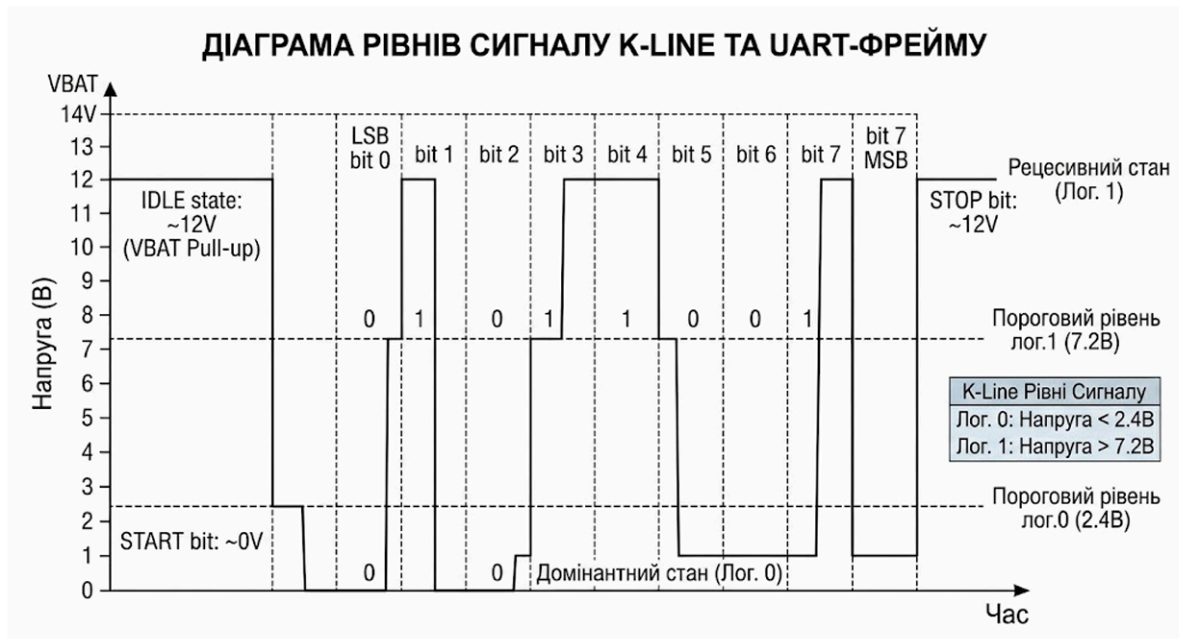


Рисунок 2.5 — Діаграма рівнів сигналу K-Line та структура UART-фрейму (ISO 9141-2)

Швидкість передачі даних у нормальному режимі обміну: 10 400 бод $\pm 0,5\%$. Бітовий інтервал: $T_{\text{bit}} = 1/10400 \approx 96,15$ мкс. Формат UART-фрейму: 1 стартовий біт, 8 біт даних (LSB першим), 1 стоповий біт — без біту парності. Таким чином, один байт займає 10 бітів, час передачі одного байту: $T_{\text{byte}} = 10 \times 96,15 = 961,5$ мкс ≈ 1 мс.

Часові параметри фронтів сигналу є важливими для забезпечення сумісності з різними ЕБУ. Час наростання фронту (T_{rise} , від 10% до 90% VBAT): не більше 5 мкс (рекомендовано не більше 2 мкс для нових розробок).

Час спадання фронту (T_{fall} , від 90% до 10% VBAT): не більше 5 мкс. Ці обмеження визначають максимально допустиму ємність лінії K-Line: при підтягуючому резисторі 510 Ом та $T_{\text{rise}} = 5$ мкс: $C_{\text{max}} = T_{\text{rise}} / (2,2 \times R_{\text{pull}}) = 5 \times 10^{-6} / (2,2 \times 510) \approx 4,5$ нФ, що відповідає кабелю довжиною до 3–4 метрів з типовою погонною ємністю 100–150 пФ/м.

2.3.2 Процедура ініціалізації ISO 9141-2 та тайм-аути

На відміну від CAN, де вузли можуть починати передачу в будь-який момент (після арбітражу), K-Line вимагає чіткої процедури ініціалізації перед початком діагностичного сеансу. Ця процедура є одним з найважливіших аспектів протоколу, оскільки визначає сумісність між діагностичним адаптером та конкретним ЕБУ автомобіля.

Стандарт ISO 9141-2 визначає процедуру 5-бодової ініціалізації (5-baud initialization). Назва походить від швидкості передачі ініціалізаційної послідовності — 5 бод (бітовий інтервал 200 мс), що є у 2080 разів повільнішою за робочу швидкість 10 400 бод. Така повільна ініціалізація дозволяє ЕБУ з різними тактовими частотами та обмеженими можливостями вимірювання часу коректно визначити початок сеансу.

Послідовність ініціалізації ISO 9141-2 складається з таких кроків. Крок 1 — очікування (W0): лінія K-Line перебуває у рецесивному стані (12 В) не менше 2 секунд після увімкнення запалювання. Крок 2 — передача адреси ініціалізації: адаптер передає байт 0x33 зі швидкістю 5 бод по лінії K-Line (та опціонально по L-Line). Байт 0x33 у двійковому поданні: 0b00110011, LSB першим: стартовий біт (200 мс низький) → 1 (200 мс) → 1 (200 мс) → 0 (200 мс) → 0 (200 мс) → 1 (200 мс) → 1 (200 мс) → 0 (200 мс) → 0 (200 мс) → стоповий біт (200 мс). Загальний час передачі адреси: $10 \times 200 \text{ мс} = 2000 \text{ мс} =$

2 с. Крок 3 — очікування відповіді W1 (60–300 мс): ЕБУ підтверджує прийом адреси синхронізаційним байтом 0x55 (01010101), переданим зі швидкістю 10 400 бод по K-Line. Крок 4 — прийом ключових слів: ЕБУ передає два байти KB1 та KB2 (Keyword Bytes), що ідентифікують підтримувані можливості. Пауза W2 між KB1 та KB2: 5–20 мс. Крок 5 — підтвердження: адаптер передає інвертований KB2 (тобто $\sim$ KB2) на підтвердження прийому. Пауза W3: 25–50 мс. Крок 6 — фінальне підтвердження: ЕБУ передає інвертований байт адреси ($\sim$ 0x33 = 0xCC) для підтвердження встановлення з'єднання.

Стандарт ISO 14230-4 (KWP2000) визначає альтернативну, значно швидшу процедуру Fast Initialization, що складається з двох кроків: адаптер утримує K-Line у домінантному стані (0 В) протягом 25 мс, після чого переводить лінію у рецесивний стан на 25 мс. ЕБУ, що підтримує Fast Init, реагує на цю послідовність і переходить до обміну зі швидкістю 10 400 бод без 5-бодової послідовності. Fast Init суттєво прискорює встановлення з'єднання (з $\sim$ 5 секунд до менш ніж 1 секунди), однак підтримується не всіма ЕБУ — особливо старішими.

Після успішної ініціалізації між адаптером та ЕБУ встановлюється діагностичний сеанс. Підтримання сеансу вимагає регулярного обміну — якщо протягом часу P3 (максимум 5 секунд) адаптер не надішле запит, ЕБУ вважає сеанс завершеним та повертається у стан очікування нової ініціалізації. Тайм-аут відповіді ЕБУ на запит (P2): 25–50 мс (для стандартних PID) або до 5 секунд (для деяких розширених функцій).

2.3.3 Структура повідомлень KWP2000 (ISO 14230)

Протокол KWP2000 (Keyword Protocol 2000, ISO 14230) є розвитком ISO 9141-2 і визначає структуру повідомлень (PDU — Protocol Data Unit) для діагностичного обміну. KWP2000 забезпечує більш структурований підхід до формування запитів та відповідей порівняно з базовим ISO 9141-2.

Структура повідомлення KWP2000 (формат з довгим заголовком): байт формату (Format Byte, FMT) — визначає тип адресації та наявність довжини; байт цільової адреси (Target Address, TGT) — адреса ЕБУ-отримувача; байт адреси джерела (Source Address, SRC) — адреса відправника (адаптера, зазвичай 0xF1); байт довжини (Length, LEN) — кількість байт даних; байти даних (Data Bytes) — від 1 до 255 байт корисного навантаження; контрольна сума (Checksum, CS) — один байт, що є арифметичною сумою всіх попередніх байтів по модулю 256.

Байт формату кодує тип повідомлення. Старші два біти (біти 7–6) визначають тип адресації: 00 — без адресації (тільки фізична адреса), 01 — фізична адресація (unicast), 10 — функціональна адресація (broadcast), 11 — зарезервовано. Молодші шість бітів (біти 5–0) вказують кількість байт даних (0 означає, що довжина вказана окремим байтом LEN). Типовий запит від адаптера до ЕБУ двигуна: FMT=0x80, TGT=0x01 (адреса ЕБУ двигуна), SRC=0xF1 (адаптер), LEN=0x02, Data=[0x01, 0x0C] (ReadDataByLocalIdentifier, PID 0x0C — оберти двигуна), CS=сума. Відповідь ЕБУ: FMT=0x80, TGT=0xF1, SRC=0x01, LEN=0x03, Data=[0x41, 0x0C, HH, LL], CS.

KWP2000 визначає набір сервісів (Services), що відповідають режимам OBD-II та деяким UDS-сервісам. Сервіс 0x10 StartDiagnosticSession — ініціалізація розширеної сесії для доступу до функцій, недоступних у стандартному режимі. Сервіс 0x1A ReadECUIdentification — читання

ідентифікаційних даних ЕБУ (VIN, версія прошивки, калібрування). Сервіс 0x21 ReadDataByLocalIdentifier — аналог OBD-II режиму 01, читання поточних значень параметрів. Сервіс 0x2C DynamicallyDefineLocalIdentifier — динамічне визначення власних груп параметрів для одночасного зчитування. Сервіс 0x14 ClearDiagnosticInformation — очищення кодів несправностей. Сервіс 0x18 ReadDTCByStatus — читання DTC із фільтрацією за статусом.

Таблиця 2.2 — Основні сервіси KWP2000 (ISO 14230) та їх відповідність OBD-II режимам

Код сервісу	Назва KWP2000	Відповідний OBD-II режим	Призначення
0x10	StartDiagnosticSession	—	Відкриття розширеної сесії
0x11	ECUReset	—	Перезапуск ЕБУ
0x14	ClearDiagnosticInformation	Mode 04	Очищення DTC
0x18	ReadDTCByStatus	Mode 03	Читання DTC з фільтром
0x1A	ReadECUIdentification	Mode 09	Ідентифікація ЕБУ, VIN
0x21	ReadDataByLocalIdentifier	Mode 01	Поточні параметри (PID)
0x22	ReadDataByCommonIdentifier	Mode 01	Параметри за загальним ID
0x2C	DynamicallyDefineLocalID	—	Групове читання параметрів
0x30	InputOutputControlByLocalID	Mode 08	Активні тести актуаторів
0x3E	TesterPresent	—	Підтримання сеансу активним

2.4 Порівняльний аналіз протоколів CAN та K-Line та їх застосування у сучасних автомобілях

Розуміння відмінностей між протоколами CAN та K-Line є необхідним для коректного проектування діагностичного адаптера, що підтримує обидва протоколи. Ці протоколи суттєво різняться за архітектурою, продуктивністю та сферою застосування, що визначає вимоги до апаратної реалізації кожного з каналів.

Архітектурна відмінність є найбільш фундаментальною. CAN є мережевим протоколом рівноправних вузлів (multi-master, peer-to-peer): будь-який вузол може ініціювати передачу у будь-який момент, арбітраж відбувається апаратно та неструктурно. K-Line є протоколом типу «ведучий-ведений» (master-slave): тільки діагностичний адаптер (master) ініціює запити, ЕБУ (slave) лише відповідає. Це суттєво спрощує реалізацію K-Line на стороні ЕБУ, але обмежує можливості мережевого протоколу.

Продуктивність двох протоколів відрізняється принципово. CAN при швидкості 500 кбод теоретично забезпечує пропускну здатність до 500 000 біт/с, що при типовому розмірі кадру 100 біт дає до 5000 кадрів/с. На практиці при OBD-II діагностиці через CAN можна отримати до 50–100 параметрів/с. K-Line при 10 400 бод та розмірі повідомлення 10 байт (80 біт даних + 20 біт накладних витрат = ~10 мс) забезпечує до 100 байт/с корисних даних, або приблизно 5–10 окремих параметрів/с. Таким чином, CAN перевершує K-Line за швидкістю приблизно у 10–20 разів у контексті OBD-II діагностики.

Завадостійкість CAN є значно вищою завдяки диференційній передачі. Синфазні завади (від системи запалювання, електродвигунів, реле) однаково

впливають на обидва провідники CANH та CANL і компенсуються диференційним приймачем. K-Line як однопровідна асиметрична система є більш чутливою до електромагнітних завад, що потребує ретельного екранування та фільтрації у реальних автомобільних умовах.

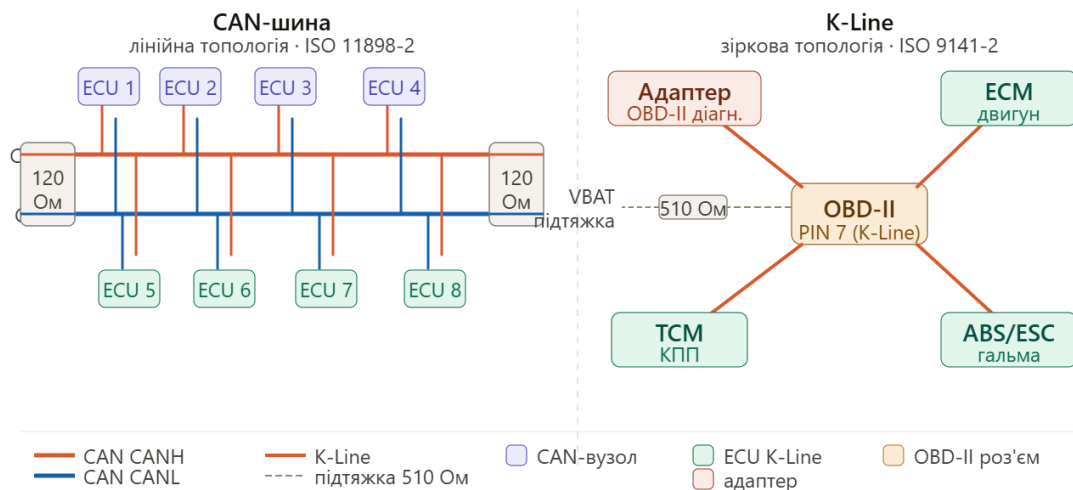


Рисунок 2.6 — Порівняння топологій: лінійна CAN-шина (ліворуч) та зіркова K-Line від OBD-II PIN 7 (праворуч)

Сфера застосування у сучасних автомобілях визначається роком випуску та маркою. Для автомобілів випуску до 2001–2003 року (європейські та японські виробники) K-Line є основним або єдиним діагностичним протоколом. Для американських автомобілів Ford та GM до 2008 року домінували SAE J1850 PWM та VPW відповідно. Починаючи з 2008 року (обов'язковість CAN за стандартом ISO 15765-4 у США) та приблизно з 2006–2010 року для більшості інших ринків, CAN став основним протоколом OBD-II. Проте навіть у нових автомобілях, де CAN є основним протоколом бортової мережі, K-Line може використовуватись для окремих підсистем — наприклад, іммобілайзер у автомобілях VAG (Volkswagen, Audi, Skoda, SEAT) нерідко залишається на K-Line навіть у моделях 2015–2020 років.

Перспектива розвитку протоколів свідчить про подальше витіснення K-Line. Стандарт CAN FD (CAN with Flexible Data-Rate, ISO 11898-1:2015) забезпечує швидкість до 8 Мбіт/с у фазі даних та кадри до 64 байт, що в разі покращує пропускну здатність. Ще новіший стандарт Automotive Ethernet (100BASE-T1, 1000BASE-T1) забезпечує ще вищу пропускну здатність для завантаження оновлень прошивки та роботи з камерами та LIDAR. Проте для діагностики автомобілів, що перебувають в експлуатації сьогодні, підтримка K-Line залишається обов'язковою.

Таблиця 2.3 — Порівняльна характеристика протоколів CAN (ISO 15765-4) та K-Line (ISO 9141-2)

Характеристика	CAN (ISO 15765-4)	K-Line (ISO 9141-2 / ISO 14230-4)
Фізичний рівень	Диференційна пара (CANH/CANL)	Однопровідна шина з підтяжкою до VBAT
Контакти OBD-II	PIN 6 (CANH), PIN 14 (CANL)	PIN 7 (K-Line), PIN 15 (L-Line, опц.)
Швидкість передачі	250 або 500 кбод (до 1 Мбод)	10 400 бод (фіксована)
Топологія	Шина (лінійна) з термінаторами	Зірка / точка-точка (master-slave)
Арбітраж	Апаратний, побітовий (CSMA/CA)	Немає (тільки master ініціює)
Макс. розмір кадру даних	8 байт (CAN 2.0), 64 байт (CAN FD)	255 байт (KWP2000)
Завадостійкість	Висока (диференційна передача)	Середня (синфазні завади впливають)
Продуктивність (OBD-II)	50–100 параметрів/с	5–10 параметрів/с
Час ініціалізації	Немає (вузол одразу активний)	~5 с (5-baud) або < 1 с (Fast Init)

Характеристика	CAN (ISO 15765-4)	K-Line (ISO 9141-2 / ISO 14230-4)
Напруга логічних рівнів	Диференційна: 0–3,5 В	Однополярна: 0–VBAT (0–12 В)
Захист від замикань	Трансивер ISO1050DUB: до ± 36 В	L9637D: до +40 В, струмообмеження
Застосування в авто	Всі авто після 2008 р., основна шина	Авто 1996–2012 р., деякі підсистеми нових авто
Апаратна реалізація в пристрої	STM32 bxCAN + ISO1050DUB	STM32 UART + L9637D + PCB817 + 2N7002

Порівняльний аналіз підкреслює, що два протоколи є взаємодоповнюючими, а не взаємозамінними. Жоден з них не може повністю замінити інший з огляду на широкий парк автомобілів у реальній експлуатації. Саме тому розроблюваний адаптер підтримує обидва протоколи в одному пристрої — це є ключовою перевагою порівняно з більшістю існуючих рішень, що реалізують лише один протокол або використовують АТ-інтерпретатор з обмеженими можливостями.

Висновок до розділу 2. У даному розділі розглянуто теоретичні основи двох ключових діагностичних протоколів OBD-II. Встановлено, що CAN (ISO 15765-4) є швидшим (500 кбод проти 10,4 кбод), завадостійкішим (диференційна передача) та архітектурно гнучкішим (multi-master) порівняно з K-Line. Водночас K-Line (ISO 9141-2, ISO 14230-4) залишається незамінним для діагностики значної частини автомобільного парку. Детальне вивчення фізичних рівнів, процедур ініціалізації та структур повідомлень обох протоколів є необхідною теоретичною основою для проектування апаратної частини адаптера, що описується у наступному розділі.

РОЗДІЛ ЗПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ АДАПТЕРА

3.1 Загальна архітектура пристрою та структурна схема

Розроблюваний USB-адаптер побудований на основі дворівневої архітектури з повною гальванічною ізоляцією між двома функціональними доменами. Перший — USB-домен — містить мікроконтролер DD1 (STM32F411RCTx), захист ESD DD4 (USBLC6-2SC6), стабілізатор DA5 (AMS1117-3.3) та роз'єм XS2 (USB Type-B). Другий — AUTO-домен — містить ізований CAN-трансивер DD2 (ISO1050DUB), драйвер K-Line DA6 (L9637D) та компоненти ізованого живлення. Між доменами відсутнє пряме провідникове з'єднання — обмін сигналами та енергією здійснюється виключно через три ізольованих бар'єри: DD2 для CAN (2500 В RMS), V7/V8+VT1 для K-Line (5000 В RMS) та DD3 для живлення (1000 В DC). Земляні шини GND та GND2 є електрично незалежними.

Будь-які збурення у бортовій мережі автомобіля — перенапруга при відключенні акумулятора, індуктивні викиди стартера, завади системи запалювання — не можуть безпосередньо впливати на USB-домен та підключений ПК. Наявність двох джерел живлення (VBAT від OBD-II та VBUS від USB) гарантує роботу адаптера як при підключеному автомобілі, так і виключно від USB для налагодження.

3.2 Вибір та обґрунтування компонентів схеми

Вибір конкретних компонентів визначається технічними вимогами, доступністю та відповідністю схемотехнічним рішенням. Нижче наведено обґрунтування вибору кожного ключового компонента.

3.2.1 Мікроконтролер DD1 (STM32F411RCTx)

STM32F411RCTx від STMicroelectronics є основним обчислювальним компонентом пристрою. Ядро ARM Cortex-M4 з FPU на частоті до 100 МГц, 512 КБ Flash, 128 КБ SRAM. Вибір обумовлений наявністю в одному корпусі LQFP-64 трьох апаратних блоків, необхідних для проекту: бxCAN (CAN 2.0A/B до 1 Мбод, 14 апаратних фільтрів), USB 2.0 Full Speed 12 Мбіт/с у режимі CDC Virtual COM Port без зовнішніх компонентів, та трьох UART/USART для K-Line й налагодження. Зріла екосистема розробки (STM32CubeIDE, HAL-бібліотеки) та широка документація роблять цей МК природним вибором.

Таблиця 3.1 — Ключові характеристики DD1 (STM32F411RCTx)

Параметр	Значення
Ядро / частота	ARM Cortex-M4 з FPU / 100 МГц
Flash / SRAM	512 КБ / 128 КБ
USB	Full Speed 2.0, 12 Мбіт/с, CDC (Virtual COM Port)
CAN	бxCAN 2.0A/B, 10 кбод–1 Мбод, 14 фільтрів
UART/USART	3 × повнодуплексних, до 12,5 Мбод
GPIO	До 50 ліній (LQFP-64, крок 0,5 мм)
Напруга живлення	1,7–3,6 В
Діапазон температур	–40...+85 °C (Industrial)
Споживання (100 МГц)	~100 мА типово

3.2.2 Ізольований CAN-трансивер DD2 (ISO1050DUB)

ISO1050DUB від Texas Instruments суміщає в одному корпусі SOIC-8 Wide Body цифровий ємнісний ізолятор на базі SiO₂ та CAN-трансивер (ISO 11898-2). Має два незалежних ланцюги живлення: VCC1 (+3,3 В, GND1 — USB-домен) та VCC2 (+5V_ISO, GND2 — AUTO-домен). Витримувальна

напруга — 2500 В RMS (UL 1577). Затримка поширення сигналу через ізолятор — 18–25 нс, що не обмежує роботу CAN навіть на 1 Мбод. Захист виходів CANH/CANL від перенапруг до ± 36 В. Альтернативи — два окремих компоненти (ADUM1201 + TJA1050) або ISO1042 (CAN FD, надлишково) — поступаються за компактністю схемотехнічного рішення.

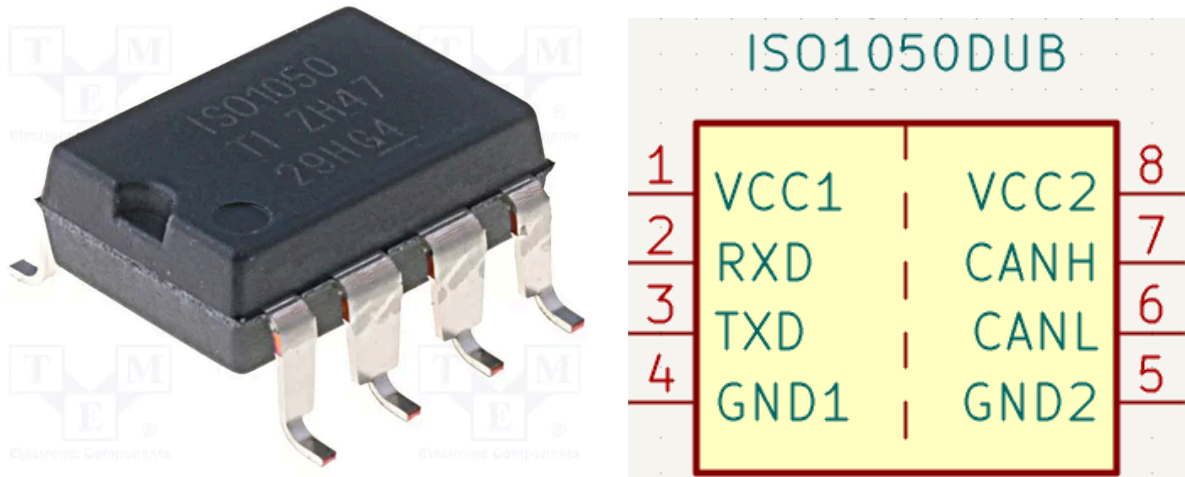


Рисунок 3.1 — Мікросхема DD2 ISO1050DUB: зовнішній вигляд корпусу SOIC-8 (ліворуч) та цоколівка виводів (праворуч)

3.2.3 Драйвер K-Line DA6 (L9637D)

L9637D від STMicroelectronics — спеціалізований монолітний драйвер K-Line (ISO 9141). Живлення: BATT (+7–18 В) для формування рівнів шини та VCC (+5V_ISO) для внутрішньої логіки. Містить внутрішній підтягуючий резистор 510 Ом між виводом K та BATT — у рецесивному стані (TX=«1») K-Line утримується на рівні VBAT без зовнішніх компонентів. При TX=«0» вихідний ключ притягує K-Line до GND2 — домінантний стан. Захист виходу від перенапруг до +40 В та від короткого замикання. DA6 знаходиться в AUTO-домени; сигнали TX/RX проходять через оптронну розв'язку V7/V8 перед з'єднанням з DD1.

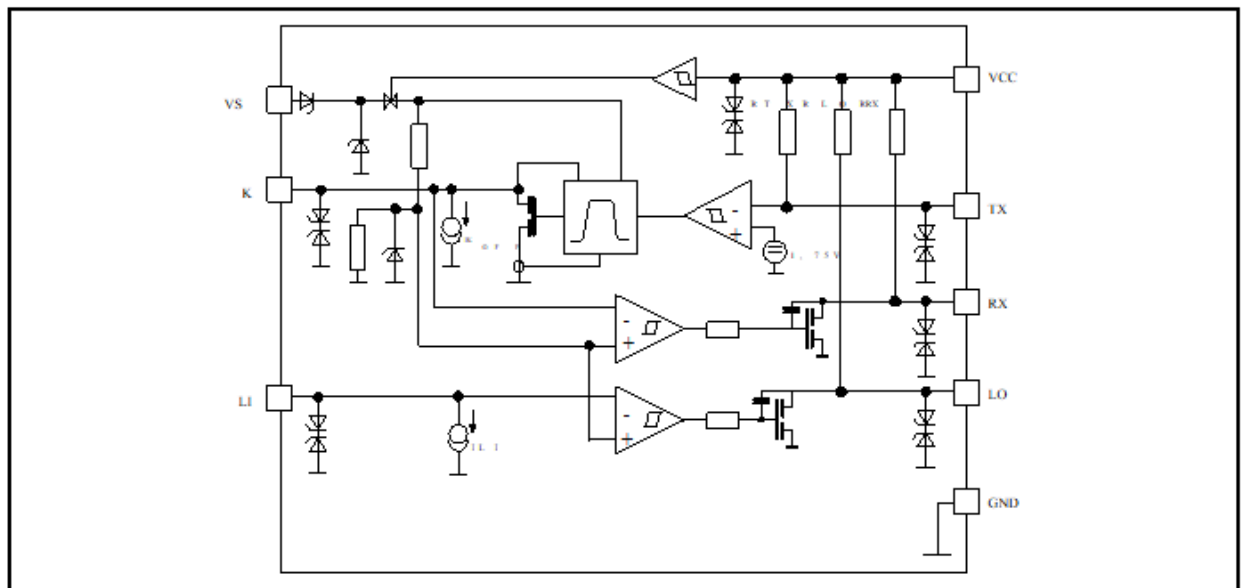
BLOCK DIAGRAM

Рисунок 3.2 — Внутрішня блок-схема мікросхеми Dab L9637D — монолітного драйвера K-Line (ISO 9141)

3.2.4 Ізольований DC/DC перетворювач DD3 (NXE1S0505MC)

NXE1S0505MC від Murata — мінімалістичний ізольований перетворювач у корпусі SIP-7 з вбудованим трансформатором. Вхід +5 В (USB-домен), вихід +5V_ISO (AUTO-домен), максимальна потужність 1 Вт, ККД до 80%, ізоляція 1000 В DC. Для роботи потрібні лише два зовнішні конденсатори: C18 (4,7 мкФ) на вході та C19 (10 мкФ) на виході. Споживання AUTO-домену не перевищує 50 мА (250 мВт) — 25% від максимуму DD3, що

забезпечує комфортний тепловий режим.

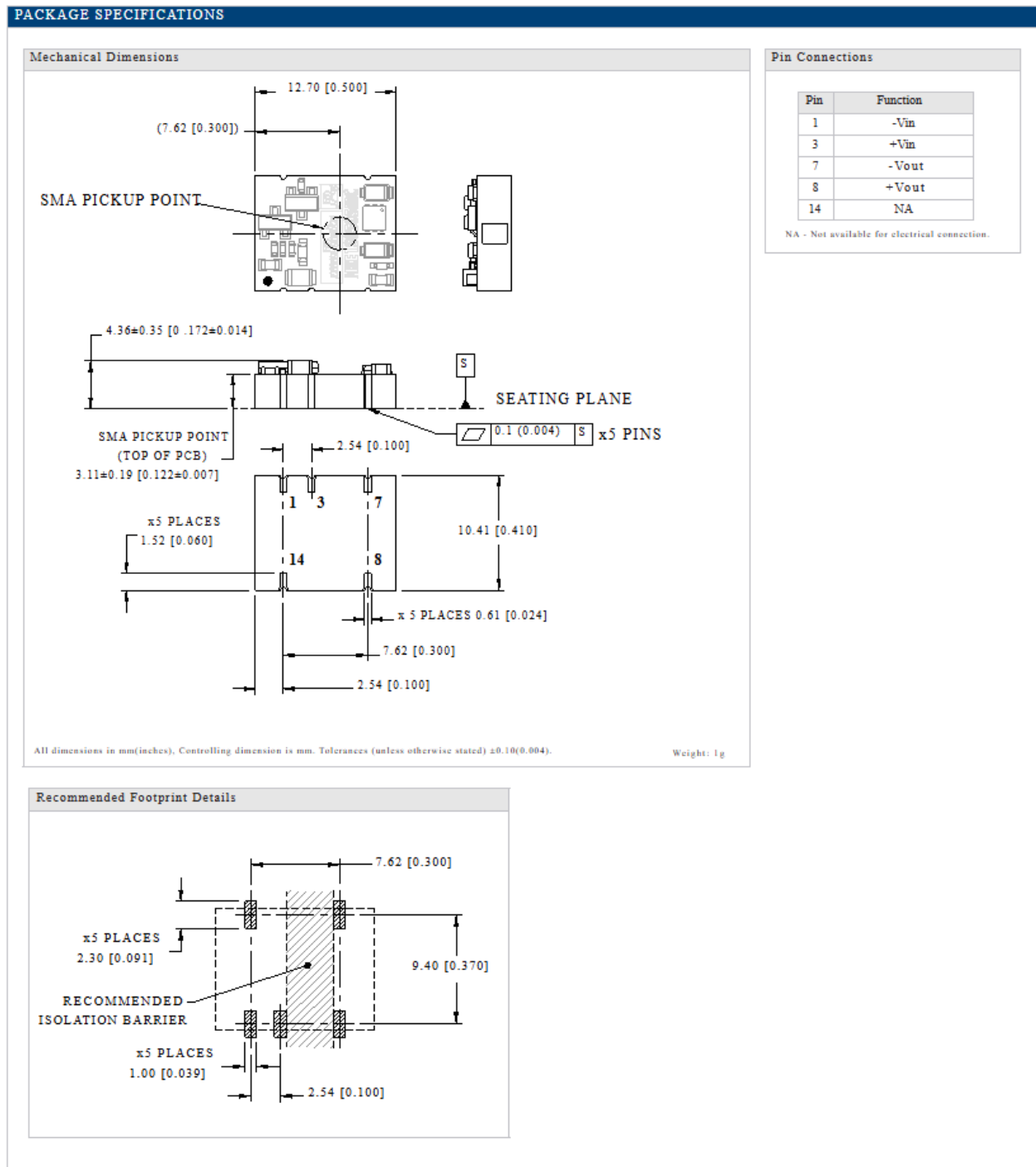


Рисунок 3.3 — Габаритне креслення та розпіновка ізольованого DC/DC перетворювача DD3 NXE1S0505MC (корпус SIP-7)

3.2.5 Захист USB DD4 (USBLC6-2SC6) та стабілізатор DA5 (AMS1117-3.3)

USBLC6-2SC6 від STMicroelectronics — спеціалізований захист ліній USB, розміщений безпосередньо після роз'єму XS2. Паралельно до ліній D+/D– підключений VD1 (NUP2105L) — TVS-діод для захисту від ESD до ± 8 кВ (IEC 61000-4-2, рівень 4). Власна ємність на лінію — лише 0,5 пФ, що не спотворює сигнал USB FS. AMS1117-3.3 — LDO-стабілізатор з вихідною напругою +3,3 В та максимальним струмом 1 А. Забезпечує живлення DD1 та всіх компонентів USB-домену від спільної шини +5 В (VBUS або після перетворення з VBAT). Корпус SOT-223 забезпечує достатнє розсіювання тепла.

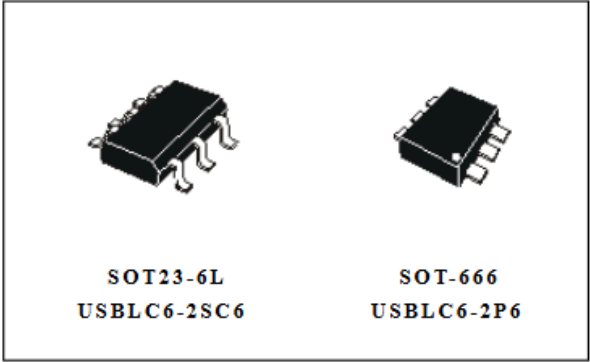


Table 1: Order Codes

Part Number	Marking
USBLC6-2SC6	UL 2 6
USBLC6-2P6	F

Figure 1: Functional Diagram

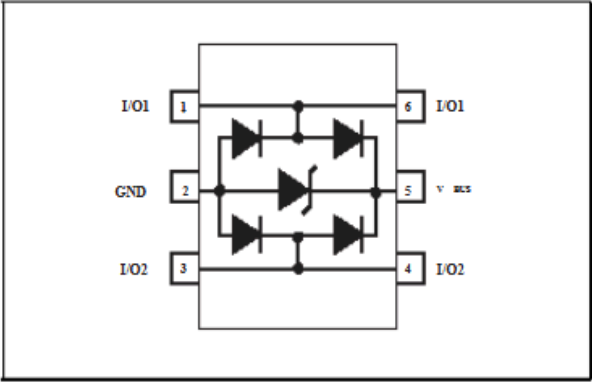


Рисунок 3.4 — Корпуси та внутрішня функціональна схема мікросхеми DD4 USBLC6-2SC6 (ESD-захист USB)

■ Block Diagram

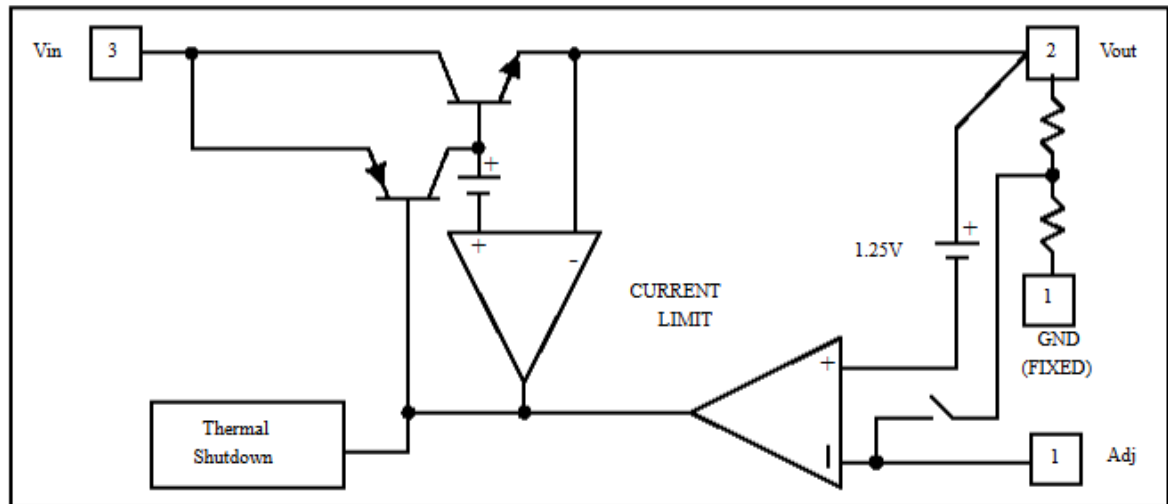


Рисунок 3.5 — Внутрішня блок-схема стабілізатора Da5 AMS1117-3.3 (LDO, 1 A)

3.2.6 Оптрони V7 (PC817) та V8 (6N137) і ключ VT1 (2N7002)

V7 (PC817) — чотирививідний оптрон (DIP-4/SMD) з інфрачервоним LED та NPN-фототранзистором. Ізоляційна напруга 5000 В RMS. CTR = 80–300% залежно від класу. Використовується у TX-каналі K-Line. Між GPIO DD1 (PA9) та LED оптрона V7 встановлений транзистор VT2 (BC847, NPN, SOT-23) для узгодження рівнів 3,3 В CMOS з необхідним струмом LED через резистор R9 (330 Ом). Фототранзистор V7 керує затвором VT1 (2N7002, N-MOSFET, SOT-23, $V_{DS} = 60$ В). VT1 як ключ з відкритим стоком безпосередньо керує входом TX мікросхеми Da6. Резистор R8 (10 кОм) підтягує затвор VT1 до +5V_ISO — забезпечує рецесивний стан K-Line при відсутності сигналу.

V8 (6N137) — високошвидкісний одноканальний оптрон з логічним виходом (LSTTL/CMOS сумісний), ізоляційна напруга 5000 В RMS, максимальна

швидкість передачі 10 Мбод. Використовується у RX-каналі K-Line: вихід RX мікросхеми Da6 (+5V_ISO рівні) через резистор R5 (10 кОм) керує LED V8, а відкритий колекторний вихід V8 через підтягуючий резистор R6 (220 Ом) формує сигнал рівня 3,3 В на вході PA10 (USART1_RX) мікроконтролера DD1. Застосування 6N137 замість PC817 у RX-каналі обумовлено значно вищою швидкістю та стабільністю часових параметрів при роботі на частоті 10 400 бод.

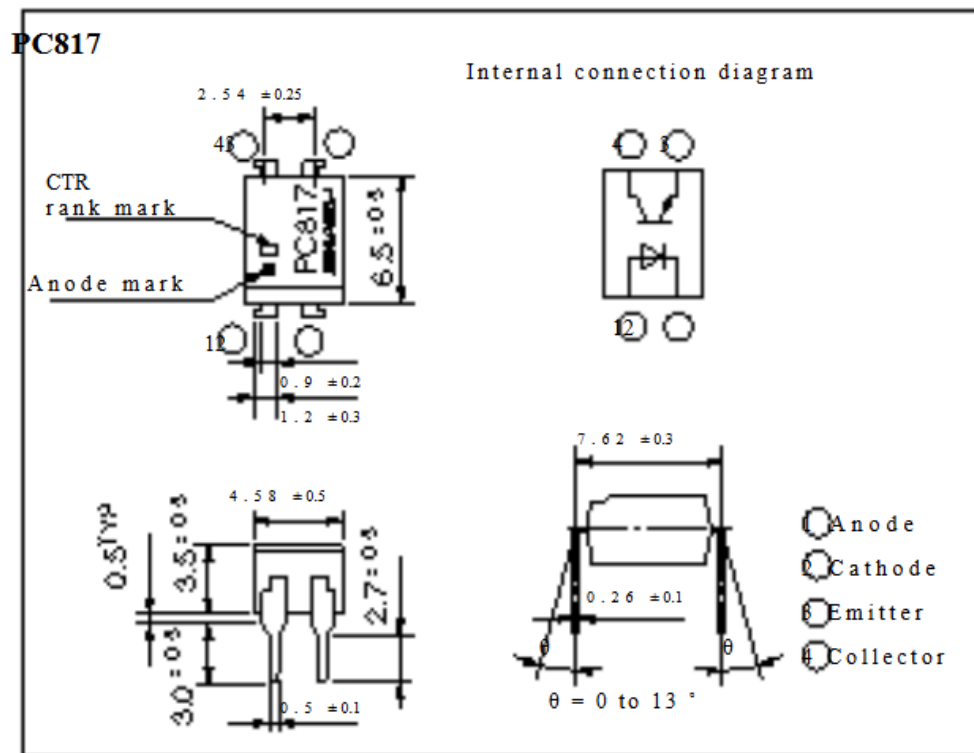
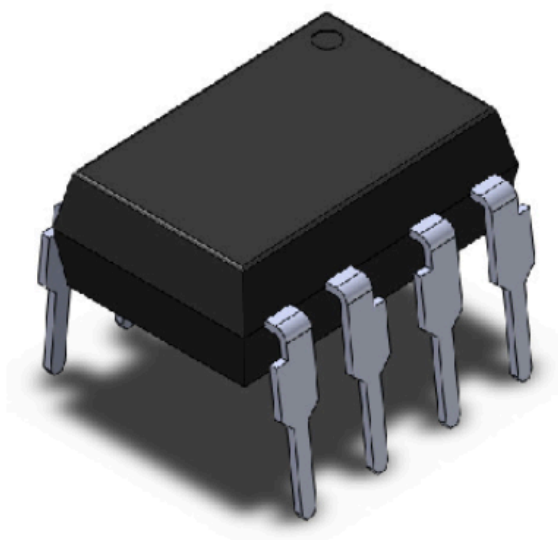


Рисунок 3.6 — Габаритне креслення та внутрішня схема оптрона: V7 PC817

Package Outline



Schematic

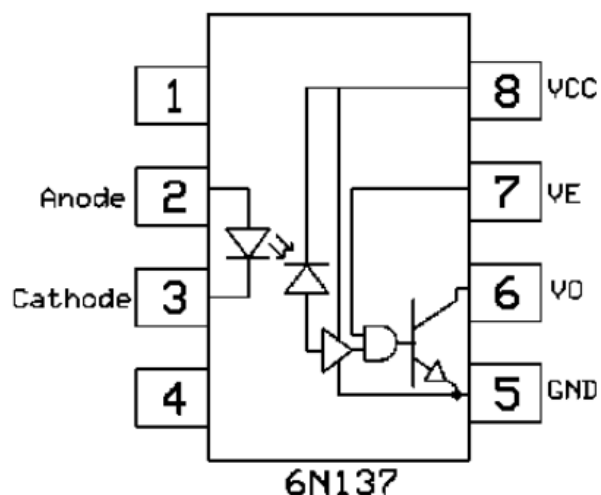


Рисунок 3.6 — Зображення та внутрішня схема оптрона 6N137

Таблиця 3.2 — Зведена таблиця ключових компонентів адаптера

Позначення	Тип	Функція	Домен
DD1	STM32F411 RCTx	Мікроконтролер (USB, bxCAN, UART)	USB
DD2	ISO1050DU B	Ізольований CAN-трансивер, 2500 B	Бар'єр
DD3	NXE1S0505 MC	Ізольований DC/DC +5B → +5V_ISO, 1000 B	Бар'єр
DD4	USBLC6-2S C6	ESD-захист ліній D+/D-	USB
DA5	AMS1117-3.3	LDO стабілізатор +3,3 B	USB
DA6	L9637D	Драйвер K-Line, підтяжка 510 Ом до BATT	AUTO

Позначення	Тип	Функція	Домен
V7/V8	PCB817	Оптронна розв'язка TX (V7) та RX (V8), 5000 В RMS	Бар'єр
VT1	2N7002	N-MOSFET ключ TX K-Line (AUTO-домен)	AUTO
VT2	BC847	NPN ключ LED TX-каналу (USB-домен)	USB
VD1	NUP2105L	TVS-діод у складі DD4	USB
ZQ1	Кварц 8 МГц	Тактування для USB та UART DD1	USB
SB1	SW_Push	Кнопка апаратного скидання NRST	USB
HL2	LED + R3 (1 кОм)	Індикатор живлення від OBD-II	USB
HL3	LED + R4 (1 кОм)	Індикатор живлення від USB	USB
HL4	LED + R9 (330 Ом)	Індикатор активності (GPIO PC13)	USB
XS1	OBD-II (SAE J1962)	Роз'єм підключення до автомобіля	AUTO
XS2	USB Type-B	Роз'єм підключення до ПК	USB

3.3 Детальний опис схеми електричної принципової

У даному підрозділі описано шість функціональних вузлів принципової схеми (Додаток А). Позиційні позначення відповідають схемі за ГОСТ 2.710.

3.3.1 Вузол живлення від OBD-II (+12 В)

Основним джерелом живлення є бортова мережа автомобіля (+12 В) через PIN 16 роз'єму XS1. Напруга VBAT може змінюватись від 9 В (розряджений акумулятор) до 14,8 В (заряджений при працюючому

генераторі). Стандарт ISO 7637 регламентує допустимі імпульсні збурення до +37 В (тип 2а) та ± 200 В мікросекундної тривалості (тип 3а/3б).

Від VBAT через резистор R3 (1 кОм) та індикаторний світлодіод HL2 напруга надходить до фільтруючих конденсаторів C5 (10 мкФ, електролітичний) та C7 (100 нФ, керамічний), а далі — на вхід стабілізатора DA5. Резистор R3 обмежує струм через HL2: при VBAT = 12 В та падінні на LED 2 В — $(12 - 2) / 1000 = 10$ мА. HL2 є виключно індикатором наявності живлення від OBD-II і не виконує захисних функцій. На виході DA5 встановлені C6 (10 мкФ) та C8 (100 нФ) для стабільності LDO та блокування ВЧ-завад. Стабілізатор DA5 формує +3,3 В для всього USB-домену. Вхід DD3 (NXE1S0505MC) живиться безпосередньо від VBAT через окремий вузол (минаючи DA5), що забезпечує живлення AUTO-домену навіть у разі відсутності USB.

3.3.2 Вузол живлення від USB (+5 В) та логіка вибору джерела

Резервним джерелом є VBUS (+5 В) від PIN 1 роз'єму XS2. Безпосередньо після роз'єму встановлено DD4 (USBL6-2SC6) для захисту від ESD. Шина +5 В об'єднує VBUS та вихід DA5: при наявності обох джерел природний вибір відбувається пасивно за більшою напругою. Індикаторний HL3 з R4 (1 кОм) підключений до VBUS: $(5 - 2) / 1000 = 3$ мА — достатньо для видимості у приміщенні.

3.3.3 Ізольована шина живлення +5V_ISO

DD3 (NXE1S0505MC) формує +5V_ISO для AUTO-домену без будь-якого гальванічного зв'язку з USB-доменом. Живлення на вхід DD3 подається безпосередньо від VBAT через окремий резистивно-ємнісний вузол фільтрації, незалежно від наявності USB. Вхідний конденсатор C18 (4,7 мкФ)

та вихідний C19 (10 мкФ) — єдині зовнішні елементи перетворювача. GND2 не з'єднана з GND ніде на платі. Споживачі +5V_ISO: VCC2 DD2 (~8 мА), VCC DA6 (~15 мА), LED-ланцюги V7/V8 (~10 мА/канал) — загальне споживання ≤ 50 мА (250 мВт), що складає 25% від максимальної потужності DD3 (1 Вт). При проектуванні плати між доменами необхідний фізичний розрив у площині GND відповідно до вимог IEC 60950.

3.3.4 Вузол CAN: трансивер та ізолятор

Центральний елемент вузла — DD2 (ISO1050DUB). З боку USB-домену: TXD → PB9 (CAN1_TX AF9), RXD → PB8 (CAN1_RX AF9), VCC1 = +3,3 В, GND1. З боку AUTO-домену: VCC2 = +5V_ISO, GND2, виходи CANH та CANL → PIN 6 та PIN 14 роз'єму XS1 відповідно. Блокувальні конденсатори C16 та C17 (по 100 нФ) встановлені безпосередньо біля виводів VCC1 та VCC2. Резистор R2 (4,7 кОм) підтягує RXD до VCC1 — запобігає невизначеному стану входу при відключеній шині CAN. Дросель L1 (22 мкГн) у ланцюзі VCC2 утворює LC-фільтр із C17 для пригнічення ВЧ-завад. Термінуючий резистор між CANH та CANL не встановлюється (DNP) — шина автомобіля вже термінована резисторами 120 Ом.

Таблиця 3.3 — Компоненти вузла CAN

Позначення	Номінал	Призначення
DD2	ISO1050 DUB	Ізольований трансивер CAN, 2500 В RMS
R2	4,7 кОм	Підтяжка RXD до VCC1 (+3,3 В)
C16, C17	100 нФ кер.	Блокування VCC1 та VCC2 DD2
L1	22 мкГн	LC-фільтр живлення VCC2 з C17

Позначення	Номінал	Призначення
R7 (DNP)	120 Ом	Термінатор (не встановлюється в штатному режимі)

3.3.5 Вузол K-Line: оптронна розв'язка та драйвер

Вузол реалізує двосторонній ізольований обмін між UART DD1 (рівні 3,3 В CMOS) та K-Line шиною автомобіля (рівні 0/+12 В) через три рівні перетворення: 3,3 В $\rightarrow$ V7/V8 (ізоляція) $\rightarrow$ 5 В CMOS $\rightarrow$ DA6 $\rightarrow$ 12 В K-Line.

TX-ланцюг (від DD1 до K-Line): PA9 (USART1_TX) через R9 (330 Ом) $\rightarrow$ база VT2 (BC847). При TX=«1»: VT2 відкривається, через LED TX-каналу V7 тече струм, фототранзистор V7 відкривається та підтягує затвор VT1 до +5V_ISO через R8 (10 кОм). VT1 закривається — TX-вхід DA6 утримується R10 (1 кОм) у стані «1» (+5V_ISO), K-Line залишається рецесивною (+12 В через внутрішній резистор 510 Ом DA6). При TX=«0»: VT2 закритий, LED не світиться, VT1 відкривається та притягує TX DA6 до GND2 — K-Line переходить у домінантний стан (0 В). Полярність зберігається: «1» UART $\rightarrow$ рецесивний K-Line, «0» UART $\rightarrow$ домінантний K-Line.

RX-ланцюг (від K-Line до DD1): вихід RX DA6 (5 В CMOS) через R5 (10 кОм) $\rightarrow$ LED оптрона V8. Фототранзистор V8 підключений між +3,3 В та PA10 (USART1_RX) через R6 (220 Ом). При рецесивному стані K-Line (+12 В): DA6 RX=«1», LED світиться, фото-VT притягує PA10 до GND $\rightarrow$ UART приймає «0». При домінантному (0 В): LED не світиться, R6 утримує PA10 в «1» $\rightarrow$ UART спокій. Резистор R8 (10 кОм) разом із внутрішньою ємністю затвора VT1 забезпечує плавне перемикання без додаткових RC-елементів.

Таблиця 3.4 — Компоненти вузла K-Line

Позначення	Номінал	Призначення
DA6	L9637D	Драйвер K-Line, підтяжка 510 Ом до BATТ, захист ± 40 В
V7/V8	PCB817	V7 — оптрон TX-каналу, V8 — оптрон RX-каналу, 5000 В RMS
VT1	2N7002	N-MOSFET ключ TX-каналу (AUTO-домен)
VT2	BC847	NPN ключ LED TX-каналу (USB-домен)
R5	10 кОм	Обмеження струму LED RX-каналу V8
R6	220 Ом	Формування рівня RX для входу PA10 (+3,3 В)
R8	10 кОм	Підтяжка затвора VT1 до +5V_ISO
R9	330 Ом	Обмеження струму бази VT2
R10	1 кОм	Підтяжка TX DA6 до +5V_ISO (рецесивний стан)
C4	100 нФ	Блокувальний конденсатор живлення (по шині +5V_ISO)

3.3.6 Вузол USB: роз'єм, кварц, індикація та скидання

Роз'єм XS2 (USB Type-B) $\rightarrow$ DD4 (USBLC6-2SC6) $\rightarrow$ PA11/PA12 (USB_DM/USB_DP). Зовнішній підтягуючий резистор на D+ не потрібен — STM32F411 має внутрішній керований підтягуючий резистор 1,5 кОм, що активується програмно при ініціалізації USB CDC. Кварцовий резонатор ZQ1 (8 МГц) з конденсаторами C1, C2 (по 22 пФ) підключений до PH0/PH1 (HSE). Кварц є обов'язковим: стандарт USB 2.0 вимагає точності частоти ± 500 ppm, тоді як внутрішній RC-генератор STM32 (HSI, $\pm 1\%$) цієї вимоги не задовольняє.

Кнопка SB1 підключена між NRST та GND. Резистор R1 (10 кОм) підтягує NRST до +3,3 В у нормальному стані; конденсатор C3 (100 нФ) між NRST та GND захищає від хибних спрацювань при перехідних процесах живлення. Індикаторний HL4 з R11 (330 Ом) підключений до PC13 (GPIO Output): $(3,3 - 2) / 330 \approx 4$ мА — безпечний струм для виходу GPIO при достатній видимості. Програмне керування HL4 дозволяє відображати стан ініціалізації USB, активність CAN/K-Line та помилки.

Таблиця 3.5 — Призначення виводів DD1 (STM32F411RCTx)

Вивід	Сигнал	Режим	Підключення
PA9	USART1_TX	AF7, Push-Pull	→ R9 → VT2 → LED TX-каналу V7
PA10	USART1_RX	AF7, Input	← фото-VT RX-каналу V8 → R6
PA11	USB_DM	USB AF10	← → DD4 → XS2 PIN2 (D-)
PA12	USB_DP	USB AF10	← → DD4 → XS2 PIN3 (D+)
PB8	CAN1_RX	AF9, Input	← RXD DD2 (ISO1050DUB)
PB9	CAN1_TX	AF9, Push-Pull	→ TXD DD2 (ISO1050DUB)
PH0	HSE_IN	Oscillator	← ZQ1 (8 МГц)
PH1	HSE_OUT	Oscillator	→ ZQ1 (8 МГц)
NRST	RESET	Спеціальний	← SB1 → GND; R1 (10 кОм) → +3,3В; C3 → GND
PC13	HL4	GPIO Output	→ R11 (330 Ом) → HL4

Висновок до розділу 3. Розроблено апаратну частину USB-адаптера діагностики автомобіля з трьома незалежними ізолюючими бар'єрами: CAN (DD2 ISO1050DUB, 2500 В), K-Line (V7/V8 PCB817 + VT1 2N7002, 5000 В),

живлення (DD3 NXE1S0505MC, 1000 В). Обґрунтовано вибір семи ключових мікросхем. Детально описано шість функціональних вузлів схеми з виправленими позиційними позначеннями відповідно до ГОСТ 2.710. Описана схема є основою для математичних розрахунків Розділу 4.

РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНІ РОЗРАХУНКИ СХЕМИ

Математичні розрахунки верифікують коректність вибору компонентів та визначають граничні умови експлуатації. Розрахунки виконано на основі технічних специфікацій компонентів та вимог стандартів ISO 9141-2, ISO 15765-4, IEC 61000-4-2.

4.1 Розрахунок ланцюга живлення

4.1.1 Стабілізатор DA5 (AMS1117-3.3)

Баланс споживання USB-домену: DD1 STM32 — 120 мА, USB-трансивер — 10 мА, DD2 VCC1 — 8 мА, HL2/HL3/HL4 — 17 мА, інші — 5 мА. Разом $I_{load} = 160$ мА. Розсіювана потужність при живленні від OBD-II ($V_{in} = V_{BAT} - V_{HL2} = 14,4 - 2 = 12,4$ В):

$$P_{ldo} = (V_{in} - V_{out}) \times I_{load} = (12,4 - 3,3) \times 0,160 = 1,456 \text{ Вт}. \quad (4.1)$$

Температура переходу при $T_A = 85$ °С, $\theta_{JC} = 5$ °С/Вт, $\theta_{CA} = 18$ °С/Вт (тепловідвідний майданчик 25×25 мм):

$$T_J = 85 + 1,456 \times (5 + 18) = 118,5 \text{ °С} < T_J(max) = 125 \text{ °С}. \quad (4.2)$$

Запас 6,5 °С є прийнятним за умови наявності майданчика. При живленні від USB: $P_{ldo} = (5,0 - 3,3) \times 0,160 = 0,272$ Вт — значно безпечніший режим.

4.1.2 DC/DC перетворювач DD3 (NXE1S0505MC)

Споживання AUTO-домену від +5V_ISO: DD2 VCC2 — 8 мА, DA6 VCC — 15 мА, V7 та V8 (два канали) — 20 мА, інші — 5 мА. Разом $I_{iso} = 48$ мА. Коефіцієнт завантаження:

$$K_{load} = P_{iso} / P_{max} = (5,0 \times 0,048) / 1,0 = 24 \%. \quad (4.3)$$

Вхідний струм при ККД $\eta = 80\%$: $I_{in} = 0,240 / (0,80 \times 5,0) = 60$ мА.
Втрати: $P_{loss} = 60$ мВт — незначні для корпусу SIP-7.

4.1.3 Фільтруючі конденсатори

Мінімальна ємність вхідного конденсатора DD3 при $f_{sw} = 300$ кГц та $\Delta V = 100$ мВ:

$$C18(min) = I_{in} / (f_{sw} \times \Delta V) = 0,060 / (300 \times 10^3 \times 0,1) = 2,0 \text{ мкФ}. \quad (4.4)$$

Встановлено $C18 = 4,7$ мкФ — запас 2,35×. Для вихідного C19 при $\Delta V_{out} = 50$ мВ: $C19(min) = 0,04$ мкФ; встановлено 10 мкФ — запас достатній. Блокувальні конденсатори по 100 нФ на кожен вивід VDD DD1 (7 шт.) ефективно шунтують завади до ~7 МГц.

4.2 Розрахунок CAN-інтерфейсу

4.2.1 Навантажувальний резистор шини CAN

При штатно термінованій шині автомобіля (60 Ом) вихідний струм DD2 у домінантному стані:

$$I_{bus} = V_{diff} / R_{load} = 3,0 / 60 = 50 \text{ мА} < I_{out(max)} = 60 \text{ мА}. \quad (4.5)$$

Умова виконується із запасом 17%. Потужність DNP-термінатора 120 Ом у лабораторному режимі: $P = 2,0^2 / 120 = 33 \text{ мВт}$ — безпечно для типорозміру 0402.

4.2.2 Затримки ISO1050DUB та максимальна швидкість

Затримка у петлі TXD→CAN→RXD: $t_{\text{loop}} = 25 + 25 = 50 \text{ нс}$ (максимум). Вимога до Prop_Seg: $\text{Prop_Seg} \geq 2 \times 50 \text{ нс} = 100 \text{ нс}$. При конфігурації 500 кбод ($t_q = 80 \text{ нс}$): $\text{Prop_Seg} = 4 t_q = 320 \text{ нс}$ — затримка ізолятора не обмежує роботу CAN навіть на 1 Мбод.

4.2.3 Завадостійкість

Запас завадостійкості у домінантному стані ($V_{\text{diff_typ}} = 2,0 \text{ В}$, поріг DOM = 0,9 В):

$$NM_{\text{dom}} = 2,0 - 0,9 = 1,1 \text{ В}; \quad NM_{\text{rec}} = 0,5 - 0,0 = 0,5 \text{ В}. \quad (4.6)$$

Запас 1,1 В перевищує типові завади автомобільної шини (50–200 мВ). Синфазний діапазон DD2: $\pm 12 \text{ В}$ відносно GND2 — відповідає ISO 11898-2.

4.3 Розрахунок K-Line інтерфейсу

4.3.1 Резистори оптронної розв'язки V7/V8

TX-канал V7: $R_9 = (V_{\text{GPIO}} - V_{\text{BE}}) / I_{\text{B}}$ при $I_{\text{B}} = 7,9 \text{ мА}$ (забезпечення надійного насичення VT2):

$$R_9 = (3,3 - 0,7) / 0,008 = 325 \text{ Ом} \rightarrow \text{встановлено } 330 \text{ Ом}. \quad (4.7)$$

RX-канал V8, $R5 = 10 \text{ кОм}$: $I_F = (5,0 - 1,2) / 10000 = 0,38 \text{ мА} \rightarrow \text{CTR } 80\% \rightarrow I_C = 0,30 \text{ мА} \rightarrow$ достатньо для формування рівня через $R6 = 220 \text{ Ом}$ на вході PA10.

4.3.2 Ключ VT1 (2N7002)

Напруга на відкритому VT1 при $I_D = V_{CC2} / (R10 + R_{DS(on)}) = 5,0 / 1012 \approx 4,95 \text{ мА}$:

$$V_{DS(on)} = 4,95 \text{ мА} \times 12 \text{ Ом} = 60 \text{ мВ} < V_{IL(max)} L9637D = 0,8 \text{ В}. \quad (4.8)$$

Умова лог. «0» на вході DA6 виконується. Час перемикання VT1: $t_{on} \approx 67 \text{ нс}$, $t_{off} \approx 9 \text{ нс}$; загальне $t_{sw} = 76 \text{ нс} \ll T_{bit} = 96 \text{ мкс}$ (K-Line 10 400 бод).

4.3.3 Часові параметри K-Line (ISO 9141-2)

Час наростання фронту при $C_{line} = 100 \text{ пФ}$ (кабель 0,5 м):

$$T_{rise} = 2,2 \times R_{pull} \times C_{line} = 2,2 \times 510 \times 100 \times 10^{-12} = 112 \text{ нс} \leq 5 \text{ мкс}. \quad (4.9)$$

При $C_{line} = 1 \text{ нФ}$ (кабель 2 м): $T_{rise} = 1,1 \text{ мкс} \leq 5 \text{ мкс}$ — вимога виконується. Точність 5-baud ініціалізації через апаратний таймер STM32: $\pm 0,001\% \ll$ вимоги $\pm 0,5\%$.

Таблиця 4.1 — Відповідність параметрів K-Line вимогам ISO 9141-2

Параметр	Вимога	Результат	Відп.
Швидкість	$10\,400 \pm 52$ бод	10 400 бод (апарат. UART)	Так
T_{rise}	$\leq 5 \text{ мкс}$	112 нс / 1,1 мкс	Так

Параметр	Вимога	Результат	Відп.
T _{fall}	≤ 5 мкс	≤ 1 мкс (DA6 datasheet)	Так
t _{sw} ключа	< 9,6 мкс (10%×T _{bit})	76 нс	Так
Точність 5-baud	± 0,5% від 200 мс	±0,001% (таймер)	Так
Рівень лог. «0» TX	< 0,8 В	60 мВ	Так

4.4 Захист USB та тепловий баланс

4.4.1 ESD-захист DD4 (USBLC6-2SC6)

Загальна ємність ліній D+/D–: C_{total} = 0,5 (TVS) + 2 (роз'єм) + 1 (трасування) + 4 (MCU) = 7,5 пФ < 10 пФ (вимога USB FS). Час наростання від ємності:

$$T_{rise} = 2,2 \times 45 \times 7,5 \times 10^{-12} = 742 \text{ нс} \ll 4 \text{ нс (вимога USB FS)}. \quad (4.10)$$

Рівень кліпування V_{clamp} ≤ 7 В при I_{peak} = 4 А — відповідає ІЕС 61000-4-2 рівня 4 (±8 кВ).

4.4.2 Загальний тепловий баланс та граничні умови

Таблиця 4.2 — Тепловий баланс пристрою при V_{BAT} = 14,4 В

Компонент	Р, Вт	ΔТ, °С
DA5 AMS1117-3.3	1,456	33,5 (SOT-223, майданчик 25×25 мм)
DD1 STM32F411	0,330	11,6 (LQFP-64)
DD3 NXE1S0505MC	0,060	4,8 (SIP-7)
DD2 ISO1050DUB	0,065	4,9 (SOIC-8W)

Компонент	P, Вт	ΔT , °C
DA6 L9637D	0,100	7,0 (SO-8)
Решта	0,103	< 5
Разом	2,114	—

Загальне розсіювання 2,114 Вт. У закритому корпусі без вентиляції $\Delta T \approx +32$ °C. Рекомендації: тепловідвідний майданчик 25×25 мм під DA5; вентиляційні отвори у корпусі; обмеження $T_A \leq 55$ °C для закритого корпусу.

Таблиця 4.3 — Граничні умови експлуатації

Параметр	Мін.	Типово	Макс.	Одиниці
Температура (від USB)	−40	+25	+85	°C
Температура (від OBD-II)	−40	+25	+70	°C
Напруга VBAT	9,0	12,0	16,0	В
Напруга VBUS	4,75	5,0	5,25	В
Струм від USB	0	113	160	мА
Швидкість CAN	—	500	1000	кбод
Швидкість K-Line	—	10,4	10,4	кбод
Ізоляція CAN (DD2)	—	—	2500	В RMS
Ізоляція K-Line (V7/V8)	—	—	5000	В RMS
ESD захист USB (DD4)	—	—	±8000	В

Висновок до розділу 4. Математичні розрахунки підтвердили коректність вибору компонентів. Критичний режим — DA5 при живленні від

OBD-II ($T_J = 118,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), що потребує тепловідвідного майданчика $25\times 25\text{ мм}$. Затримки DD2 (50 нс у петлі) не обмежують CAN до 1 Мбод. Всі часові параметри K-Line відповідають ISO 9141-2. Захист DD4 відповідає IEC 61000-4-2 рівня 4 без впливу на цілісність сигналу USB.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено завдання розробки USB-адаптера для діагностики автомобіля на базі мікроконтролера STM32F411RCTx із підтримкою протоколів CAN та K-Line та повною гальванічною ізоляцією між автомобільним та USB-доменами. За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

1. Аналіз ринку засобів автомобільної діагностики засвідчив, що жодне з існуючих рішень у доступному ціновому діапазоні не забезпечує одночасно: підтримки протоколів CAN та K-Line в одному пристрої, повної гальванічної ізоляції між OBD-II роз'ємом та інтерфейсом USB, відкритої апаратної архітектури. Відсутність гальванічної ізоляції є системним недоліком ринку і простежується у всіх категоріях — від дешевих клонів ELM327 до професійних сканерів вартістю тисячі євро. Таким чином, підтверджено актуальність та практичну значимість розроблюваного пристрою.

2. Вивчення теоретичних основ діагностичних протоколів OBD-II дозволило визначити ключові технічні вимоги до апаратної реалізації. Протокол CAN (ISO 15765-4) вимагає підтримки швидкостей 250/500 кбод, диференційної передачі з рецесивним станом 2,5 В та домінантним 2,0 В і можливості роботи з 11-бітними та 29-бітними ідентифікаторами. Протокол K-Line (ISO 9141-2) визначає жорсткі вимоги до часових параметрів: швидкість 10 400 бод $\pm 0,5\%$, час наростання фронту менше 5 мкс, спеціальна 5-бодова ініціалізаційна послідовність. Обидва протоколи вимагають узгодження рівнів між 3,3 В CMOS-логікою мікроконтролера та 12 В автомобільними рівнями.

3. Розроблена апаратна архітектура адаптера базується на концепції двох гальванічно ізольованих доменів: USB-домену (мікроконтролер STM32F411RCTx, USB-інтерфейс, стабілізатор 3,3 В) та AUTO-домену (трансивер CAN ISO1050DUB, драйвер K-Line L9637D). Зв'язок між доменами реалізовано через три ізолюючих бар'єри: мікросхема ISO1050DUB (CAN, ізоляція 2500 В RMS), оптронна пара PCB817 з ключем 2N7002 (K-Line, ізоляція 5000 В RMS), ізольований DC/DC перетворювач NXE1S0505MC (живлення, ізоляція 1000 В DC). Така архітектура забезпечує захист підключеного комп'ютера від збурень бортової мережі автомобіля, включаючи імпульси перенапруги до ± 200 В (стандарт ISO 7637).

4. Обґрунтовано вибір семи ключових компонентів схеми. Мікроконтролер STM32F411RCTx обрано завдяки наявності апаратних блоків bxCAN, USB 2.0 Full Speed та трьох UART в одному корпусі LQFP-64. Ізольований трансивер ISO1050DUB забезпечує затримку поширення сигналу 18–25 нс, що не обмежує роботу CAN на швидкостях до 1 Мбод. Драйвер K-Line L9637D містить вбудований підтягуючий резистор 510 Ом до VBAT та захист до ± 40 В. Ізольований DC/DC NXE1S0505MC при потужності 1 Вт забезпечує живлення ізольованого домену з ККД 80% та запасом по потужності 76%. Захисна мікросхема USBLC6-2SC6 з TVS-діодом NUP2105L забезпечує захист USB від ESD до ± 8 кВ (IEC 61000-4-2, рівень 4) при власній ємності лише 0,5 пФ.

5. Детальний опис принципової схеми шести функціональних вузлів виявив особливості схемотехнічних рішень. Вузол живлення від OBD-II забезпечує захист від зворотної полярності через LED-індикатор D2 та фільтрацію VBAT конденсаторами C5/C7. Вузол K-Line реалізує повністю ізольований двосторонній зв'язок через ланцюг STM32→BC847→PCB817→2N7002→L9637D у напрямку TX та

L9637D→PCB817→STM32 у напрямку RX із збереженням UART-полярності сигналів. Кварцовий резонатор 8 МГц забезпечує точність тактування, необхідну для USB ± 500 ppm.

6. Математичні розрахунки схеми підтвердили коректність схемотехнічних рішень та встановили граничні умови експлуатації. Розрахована розсіювана потужність стабілізатора AMS1117-3.3 при живленні від OBD-II становить 1,456 Вт, що потребує тепловідвідного майданчика площею не менше 25×25 мм для забезпечення $T_J = 118,5\text{ °C} < 125\text{ °C}$ при $T_A = 85\text{ °C}$. Затримки ізолятора ISO1050DUB (50 нс у петлі) не обмежують роботу CAN до 1 Мбод — запас по Prop_Seg складає більш як 220 нс. Всі часові параметри K-Line відповідають вимогам ISO 9141-2: час перемикавання ключа 76 нс при бітовому інтервалі 96 мкс, $T_{\text{rise}} = 112\text{ нс}$ при кабелі 0,5 м. Загальна ємність захищених ліній USB D+/D- складає 7,5 пФ, що не перевищує норму USB FS 10 пФ, а час наростання 742 пс є значно меншим за максимально допустимі 4 нс.

7. Визначено граничні умови експлуатації розробленого пристрою: температура навколишнього середовища від -40 до $+85\text{ °C}$ при живленні від USB та від -40 до $+70\text{ °C}$ при живленні від OBD-II; напруга бортової мережі 9–16 В; максимальний струм споживання від USB 160 мА; підтримувані швидкості CAN 125/250/500/1000 кбод; швидкість K-Line 10,4 кбод; рівень ізоляції CAN 2500 В RMS, K-Line 5000 В RMS, живлення 1000 В DC.

Таким чином, розроблений USB-адаптер діагностики автомобіля на базі STM32F411RCTx відповідає сформульованому технічному завданню та усуває ключові недоліки існуючих рішень: поєднує підтримку протоколів CAN та K-Line з повною гальванічною ізоляцією та відкритою апаратною архітектурою при орієнтовній собівартості компонентів 15–25 доларів США.

Пристрій може бути рекомендований для застосування у навчальних закладах, науково-дослідних лабораторіях та для розробки власного програмного забезпечення автомобільної діагностики.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Таблиця скорочень та аббревіатур

Скороч ення	Повна назва (англійська)	Переклад / пояснення
ABS	Anti-lock Braking System	Антиблокувальна система гальм
ADC	Analog-to-Digital Converter	Аналого-цифровий перетворювач
BLE	Bluetooth Low Energy	Bluetooth з малим енергоспоживанням
CAN	Controller Area Network	Мережа контролерів
CARB	California Air Resources Board	Каліфорнійське агентство з охорони повітряного басейну
CDC	Communications Device Class	Клас комунікаційних пристроїв USB
CTR	Current Transfer Ratio	Коефіцієнт передачі струму (оптрона)
DFU	Device Firmware Upgrade	Оновлення прошивки пристрою через USB
DID	Data Identifier	Ідентифікатор даних (UDS)
DLC	Data Length Code	Код довжини даних (CAN-фрейм)
DTC	Diagnostic Trouble Code	Код діагностичної несправності
ЕБУ	—	Електронний блок керування
ESD	Electrostatic Discharge	Електростатичний розряд
EOBD	European On-Board Diagnostics	Європейська бортова діагностика
FPU	Floating Point Unit	Блок обчислень з плаваючою крапкою
GPIO	General-Purpose Input/Output	Порт введення/виведення загального призначення
GND	Ground	Земля (нульовий потенціал)
HSE	High Speed External	Зовнішній високочастотний генератор STM32

Скороч ення	Повна назва (англійська)	Переклад / пояснення
ISO	International Organization for Standardization	Міжнародна організація зі стандартизації
KWP	Keyword Protocol	Протокол ключових слів (ISO 14230)
LDO	Low Dropout	Стабілізатор з малим падінням напруги
MCU	Microcontroller Unit	Мікроконтролер
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	Польовий транзистор МОН-структури
OBD	On-Board Diagnostics	Бортова діагностика
OTG	On-The-Go	Режим USB з динамічним вибором ролі
PCB	Printed Circuit Board	Друкована плата
PID	Parameter Identifier	Ідентифікатор параметра OBD-II
PLL	Phase Locked Loop	Фазове автопідстроювання частоти
PWM	Pulse Width Modulation	Широтно-імпульсна модуляція
SAE	Society of Automotive Engineers	Товариство автомобільних інженерів США
SRS	Supplemental Restraint System	Система додаткового утримання (подушки безпеки)
STM32	STMicroelectronics 32-bit	Сімейство 32-розрядних мікроконтролерів STM
TVS	Transient Voltage Suppressor	Пригнічувач перехідних перенапруг
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter	Універсальний асинхронний приймач-передавач
UDS	Unified Diagnostic Services	Уніфіковані діагностичні сервіси (ISO 14229)
USB	Universal Serial Bus	Універсальна послідовна шина

Скороч ення	Повна назва (англійська)	Переклад / пояснення
VCI	Vehicle Communication Interface	Інтерфейс зв'язку з транспортним засобом
VCP	Virtual COM Port	Віртуальний COM-порт
VPW	Variable Pulse Width	Змінна ширина імпульсу (SAE J1850)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 15765-4:2021. Road vehicles — Diagnostics on Controller Area Networks (CAN) — Part 4: Requirements for emissions-related systems. — Geneva: ISO, 2021. — 42 p.
2. ISO 9141-2:1994. Road vehicles — Diagnostic systems — Part 2: CARB requirements for interchange of digital information. — Geneva: ISO, 1994. — 28 p.
3. ISO 14230-4:2000. Road vehicles — Diagnostic systems — Keyword Protocol 2000 — Part 4: Requirements for emission-related systems. — Geneva: ISO, 2000. — 36 p.
4. ISO 11898-2:2016. Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 2: High-speed medium access unit. — Geneva: ISO, 2016. — 33 p.
5. ISO 14229-1:2020. Road vehicles — Unified diagnostic services (UDS) — Part 1: Application layer. — Geneva: ISO, 2020. — 370 p.
6. STMicroelectronics. STM32F411xC STM32F411xE Datasheet. Rev. 8. — STMicroelectronics, 2023. — 134 p. — URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411re.pdf>.
7. Texas Instruments. ISO1050 Isolated 1-Mbit/s CAN Transceiver Datasheet. Rev. F. — Texas Instruments, 2022. — 46 p. — URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso1050.pdf>.

8. STMicroelectronics. L9637D Monolithic Bus Driver for ISO 9141 Datasheet. — STMicroelectronics, 2003. — 18 p.
9. Murata Power Solutions. NXE Series Isolated DC/DC Converter Datasheet. — Murata, 2022. — 12 p.
10. STMicroelectronics. USBLC6-2 Very low capacitance ESD protection Datasheet. Rev. 10. — STMicroelectronics, 2021. — 14 p.
11. Advanced Monolithic Systems. AMS1117 1A Low Dropout Voltage Regulator Datasheet. — AMS, 2020. — 10 p.
12. Robert Bosch GmbH. CAN Specification Version 2.0. — Stuttgart: Bosch, 1991. — 72 p.
13. William B. Ribbens. Understanding Automotive Electronics: An Engineering Perspective. 8th ed. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. — 480 p.
14. Clemens Gühmann, Jörg Melbert, Thomas Koch. Measurement, Testing and Diagnosis with Automotive ECUs. — Berlin: Springer, 2012. — 336 p.
15. Grand View Research. Automotive Diagnostics Market Size, Share & Trends Analysis Report. — San Francisco: Grand View Research, 2023. — 180 p. — URL:
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automotive-diagnostics-market>.

ДОДАТОК А

Схема електрична принципова адаптера діагностики
РЕ-22.000000.001 ЕЗ

