

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖ У
СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни:
«Комп'ютерно інтегровані технології»
(магістерський рівень)

Ужгород – 2023

УДК 004.056.55, 003.26

Рябощук М.М., Дослідження структури промислових мереж у системах автоматизації виробництва. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Комп'ютерно інтегровані технології». Ужгород: в-во УжНУ, 2023 56 с.

Укладач:

Михайло РЯБОЩУК – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування ДВНЗ «УжНУ»

Відповідальний за випуск – Михайло РЯБОЩУК., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування ДВНЗ «УжНУ».

Методичні рекомендації розглянуто та схвалено на засіданні кафедри приладобудування, протокол № 9 від 21.06.2023 року.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 Лабораторна робота №1. Розробка комунікаційного програмного забезпечення для інтерфейсу RS-485	5
2 Лабораторна робота №2. Розробка комунікаційного програмного забезпечення для фізичного інтерфейсу "струмова петля".....	24
3 Лабораторна робота №3. Розробка комунікаційного ПЗ для фізичного інтерфейсу, вивчення промислового протоколу MODBUS	30
4 Вимоги до змісту та оформлення звіту	54
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	55

ВСТУП

Метою вивчення навчальної дисципліни «Комп'ютерно інтегровані технології» є формування у здобувачів вищої освіти умінь і навичок у роботі з промисловими мережами, програмувати і використовувати комп'ютерну інтеграцію. Крім цього формування загального розуміння структури мереж, та вміння аналізувати та вибирати необхідний інтерфейс.

Відповідно до освітньої програми, лабораторні роботи з навчальної дисципліни сприяє формуванню у здобувачів вищої освіти таких компетентностей:

- здатність здійснювати автоматизацію складних технічних й технологічних об'єктів і комплексів;
- здатність проектувати та впроваджувати високонадійні технічні системи автоматизації й робототехнічні комплекси та їх прикладне програмне забезпечення.
- здатність застосовувати сучасне спеціалізоване програмне забезпечення для комп'ютерно-інтегрованих технологій та впровадження робототехніки.

Лабораторна робота №1

Розробка комунікаційного програмного забезпечення для інтерфейсу RS-485

Мета роботи: практичне вивчення інтерфейсу фізичного рівня RS-485, а також отримання навичок розробки та використання програмного забезпечення для обміну даними з периферійним пристроєм.

Теоретичні відомості

Інтерфейс RS-485

Інтерфейси RS-485 та RS-422 описані в стандартах ANSI EIA/TIA-485-A та EIA/TIA-422. Інтерфейс RS-485 є найпоширенішим у промисловій автоматизації. Його використовують промислові мережі Modbus, Profibus DP, ARCNET, BitBus, WorldFip, LON, Interbus та безліч нестандартних мереж. Пов'язано це з тим, що за всіма основними показниками даний інтерфейс є найкращим з усіх можливих за сучасного розвитку технології. Основними його перевагами є:

- двосторонній обмін даними всього по одній кручений парі проводів;
- робота з кількома трансіверами, підключеними до однієї й тієї лінії, тобто можливість організації мережі;
- велика довжина лінії зв'язку;
- досить висока швидкість передачі.

Принципи побудови

Диференціальна передача сигналу. В основі побудови інтерфейсу RS-485 лежить диференціальний спосіб передачі сигналу, коли напруга, що відповідає рівню логічної одиниці або нуля, відраховується не від "землі", а вимірюється як різниця потенціалів між двома лініями передачі: Data+ і Data-.

При цьому напруга кожної лінії щодо "землі" може бути довільною, але не повинна виходити за діапазон $-7...+12$ В.

Приймачі сигналу є диференціальними, тобто сприймають лише різницю між напругами лінії Data+ і Data-. При різниці напруг більше 200 мВ, до +12 В вважається, що у лінії встановлено значення логічної одиниці, при напрузі менше -200 мВ, до -7 В – логічного нуля. Диференціальна напруга на виході передавача відповідно до стандарту повинна бути не менше 1,5 В, тому при порозі спрацьовування приймача 200 мВ перешкода (у тому числі падіння напруги на омичному опорі лінії) може мати розмах 1,3 В над рівнем 200 мВ. Такий великий запас необхідний роботи на довгих лініях з великим резистивним опором. Фактично, саме цей запас за напругою визначає максимальну довжину лінії зв'язку (1200 м) при низьких швидкостях передачі (менше 100 кБіт/с).

Завдяки симетрії ліній щодо "землі" в них наводяться перешкоди, близькі за формою та величиною. У приймачі з диференціальним входом сигнал виділяється шляхом віднімання напруги на лініях, тому після віднімання напруга перешкоди виявляється рівним нулю. У реальних умовах, коли існує невелика асиметрія ліній та навантажень, перешкода пригнічується не повністю, але істотно послаблюється.

Для мінімізації чутливості лінії передачі до електромагнітного наведення використовується кручена пара проводів. Струми, що наводяться в сусідніх витках внаслідок явища електромагнітної індукції, за "правилом буравчика" виявляються спрямованими назустріч один одному і взаємно компенсуються. Ступінь компенсації визначається якістю виготовлення кабелю та кількістю витків на одиницю довжини.

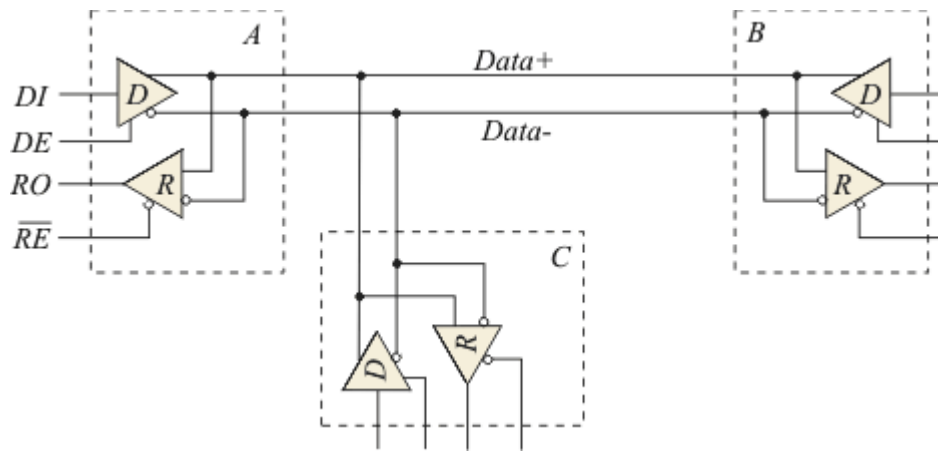


Рисунок 1.1 - З'єднання трьох пристроїв з інтерфейсом RS-485 за двопровідною схемою

Другою особливістю передавача D (D - "Driver") інтерфейсу RS-485 є можливість переведення вихідних каскадів в "третій" (високомний) стан сигналом DE (Driver Enable). Для цього замикаються обидва транзистори вихідного каскаду передавача. Наявність третього стану дозволяє здійснити напівдуплексний обмін між будь-якими двома пристроями, підключеними до лінії, всього по двох дротах. Якщо на рис передачу виконує пристрій B, а прийом - пристрій C, то виходи передавачів A і C переводяться у високоомний стан, тобто фактично до лінії підключаються тільки приймачі, при цьому вихідний опір передавачів A і C не шунтує лінію.

Переведення передавача інтерфейсу в третій стан здійснюється зазвичай сигналом RTS (Request To Send) порту COM.

Чотирьохпровідний інтерфейс RS-485 має дві версії: двопровідну та чотирипровідну. Двопровідна використовується для напівдуплексної передачі, коли інформація може передаватися в обох напрямках, але в різний час. Для повнодуплексної (дуплексної) передачі використовують чотири лінії зв'язку: за двома інформація

передається в одному напрямку, за двома іншими - у зворотному.

Недоліком чотирипровідної схеми є необхідність жорсткого вказівки ведучого та ведених пристроїв на стадії проектування системи, у той час як у двопровідній схемі будь-який пристрій може бути як у ролі ведучого, так і веденого. Перевагою чотирипровідної схеми є можливість одночасної передачі та прийому даних, що буває необхідно при реалізації деяких складних протоколів обміну.

Режим прийому відлуння

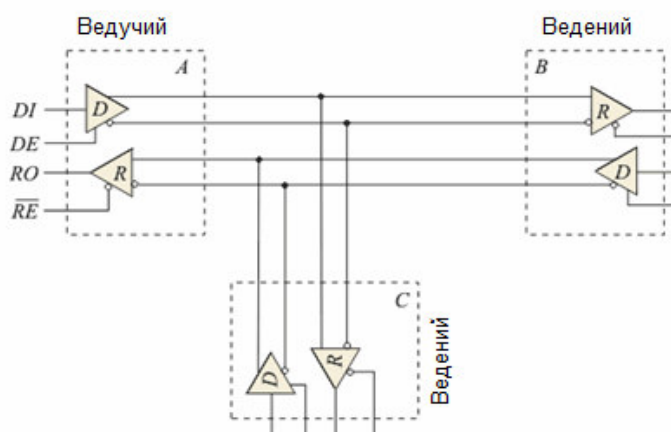


Рисунок 1.2 - Чотирипровідне з'єднання пристроїв з інтерфейсом RS-485

Якщо приймач передавального вузла включений під час передачі, то передавальний вузол приймає свої сигнали. Цей режим називається "прийомом луни" і зазвичай встановлюється мікроперемикачем на платі інтерфейсу. Прийом луни іноді використовується у складних протоколах передачі, але частіше цей режим вимкнено.

Заземлення, гальванічна ізоляція та захист від блискавки. Якщо порти RS-485, підключені до лінії передачі, розташовані на великій відстані один від одного, то їх потенціали "земель" можуть сильно відрізнятись. В цьому випадку для виключення пробую вихідних каскадів мікросхем трансіверів

(приймачів) інтерфейсу слід використовувати гальванічну ізоляцію між портом RS-485 та землею. При невеликій різниці потенціалів "землі" для вирівнювання потенціалів, в принципі, можна використовувати провідник, проте такий спосіб на практиці не застосовується, оскільки практично всі комерційні інтерфейси RS-485 мають гальванічну ізоляцію.

Захист інтерфейсу від блискавки виконується за допомогою газорозрядних та напівпровідникових пристроїв захисту.

Стандартні параметри

Останнім часом з'явилося багато мікросхем трансіверів інтерфейсу RS-485, які мають ширші можливості, ніж стандарт. Однак для забезпечення сумісності пристроїв необхідно знати параметри, описані в стандарті.

Таблиця 1.1 Параметри інтерфейсу RS-485, встановлені стандартом

Параметр	Умова	Мін.	Макс.	Одиниця виміру
Вихідна напруга передавача без навантаження	$R_{\text{наВ}}=0$	1,5 -1,5	6 -6	В В
Вихідна напруга передавача з навантаженням	$R_{\text{наВ}}=54 \text{ Ом}$	1,5 -1,5	5 -5	В В
Струм передавача к.з.	К.з. виходу на джерело живлення +12 В або на -7 В	-	± 250	мА
Тривалість переднього фронту	$R_{\text{наВ}}=54 \text{ Ом}$ $C_{\text{наВ}}=50 \text{ пФ}$	-	30	% від ширини

імпульсів передавача				імпульсу
Синфазна напруга на виході передавача	$R_{\text{нав}}=54 \text{ Ом}$	-7	+12	В
Чутливість приймача	При синфазній напрузі від -7 до +12 В	–	± 200	мВ
Синфазна напруга на вході приймача		-7	+12	В
Вхідний опір приймача		12	-	кОм
Максимальна швидкість передачі	кабелю довжиною: 12 м 1200 м	10 100	– –	Мбіт/с Кбіт/с

Узгодження лінії з передавачем та приймачем

Якщо час поширення електромагнітного поля через кабель стає порівнянно з характерними часами сигналів, що передаються, то кабель потрібно розглядати як довгу лінію з розподіленими параметрами [Попов]. Час поширення електромагнітного поля в ньому становить 60...75% від швидкості світла у вакуумі і залежить від діелектричної та магнітної проникності діелектрика кабелю, опору провідника та його конструктивних особливостей. При швидкості світла у вакуумі 300000 км/с для кабелю довжиною 1000 м можна отримати швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в кабелі 200...225 км/с та час розповсюдження 5,6 мкс.

Електромагнітна хвиля, досягаючи кінця кабелю, відбивається від нього і повертається до джерела сигналу, відбивається від джерела і знову до кінця кабелю. Внаслідок втрат на нагрівання провідника та діелектрика амплітуда

хвилі наприкінці кабелю завжди менше, ніж на початку. Для типових кабелів можна вважати, що тільки перші 3 цикли проходження хвилі істотно впливають на форму сигналу, що передається. Це дає загальну тривалість паразитних коливань на фронтах переданих імпульсів, пов'язаних із відображеннями, близько 33,6 мкс при довжині кабелю 1 км. Оскільки в приймальному вузлі універсальний трансівер (UART Universal Asynchronous Receive Transmit) визначає логічний стан лінії в центрі імпульсу, то мінімальна тривалість імпульсу, який можна розпізнати за допомогою UART, становить $33,6 \times 2 = 67,2$ мкс. Оскільки при NRZ кодуванні мінімальна тривалість імпульсу дозволяє закодувати 1 біт інформації, то отримаємо максимальну швидкість передачі інформації, яку можна прийняти незважаючи на наявність відображень, рівну $1/67,2 \text{ мкс} = 14,9 \text{ кбіт/с}$. Враховуючи, що реально умови передачі завжди гірші за розрахункові, стандартну швидкість передачі 9600 біт/с приблизно можна вважати кордоном, на якій ще можна передати сигнал на відстань 1000 м незважаючи на наявність відображень від кінців лінії.

Усунення стану невизначеності лінії

Коли передавачі всіх пристроїв, підключених до лінії, знаходяться у третьому (високоомному) стані, логічний стан лінії та входів усіх приймачів не визначено. Щоб усунути цю невизначеність, вхід приймача, що не інвертує, з'єднують через резистор з шиною живлення, а інвертуючий - з шиною "землі". Величини резисторів вибирають такими, щоб напруга між входами стала більшою за поріг спрацьовування приймача (+200 мВ).

Оскільки ці резистори виявляються підключеними паралельно лінії передачі, то для забезпечення узгодження

лінії з інтерфейсом необхідно, щоб еквівалентний опір на вході лінії дорівнював 120 Ом.

Наприклад, якщо резистори, що використовуються для усунення невизначеності стану лінії, мають опір 450 Ом кожен, то резистор для узгодження лінії повинен мати номінал 130 Ом, тоді еквівалентний опір ланцюга буде дорівнює 114 - 120 Ом. Для того, щоб знайти диференціальну напругу лінії в третьому стані всіх передавачів, потрібно врахувати, що до протилежного кінця лінії стандартної конфігурації підключений ще один резистор опором 120 Ом і до 32 приймачів з вхідним диференціальним опором 12 кОм. Тоді при напрузі живлення диференціальна напруга лінії дорівнюватиме +272 мВ, що задовольняє вимогу стандарту.

Вибір кабелю

Залежно від швидкості передачі і необхідної довжини кабелю можна використовувати спеціально спроектований для інтерфейсу RS-485 кабель, або практично будь-яку пару проводів. Кабель, спроектований спеціально для інтерфейсу RS-485, є кручений парою з хвильовим опором 120 Ом.

Для хорошого придушення випромінюваних і перешкод, що приймаються, важлива велика кількість витків на одиницю довжини кабелю, а також ідентичність параметрів всіх проводів.

При використанні неізольованих трансіверів інтерфейсу крім сигнальних проводів в кабелі необхідно передбачити ще одну кручена пара для з'єднання ланцюгів заземлення інтерфейсів, що з'єднуються. За наявності гальванічної ізоляції інтерфейсів цього не потрібно.

Кабелі можуть бути екранованими чи ні. Без експерименту дуже важко вирішити, чи потрібний екран. Однак, враховуючи, що вартість екранованого кабелю не

набагато вища, краще завжди використовувати кабель з екраном.

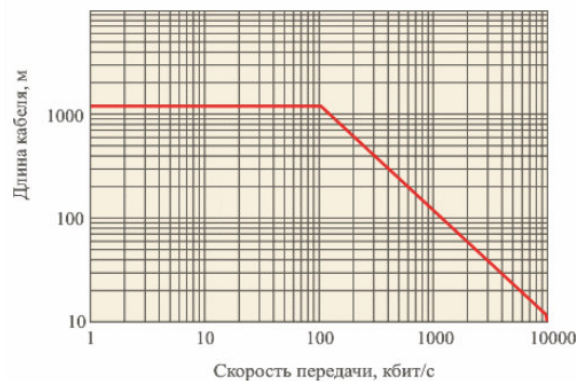


Рисунок 1.3. - Залежність допустимої довжини кабелю від швидкості передачі інтерфейсу RS-485

При низькій швидкості передачі і постійному струмі велику роль грає падіння напруги на омическом опорі кабелю. Так, стандартний кабель для інтерфейсу RS-485 перетином 0,35 кв.мм має омичний опір $48,5 \cdot 2 = 97$ Ом за довжини 1 км. При термінальному резисторі 120 Ом кабель виконуватиме роль ділянки напруги з коефіцієнтом розподілу 0,55, тобто напруга на виході кабелю буде приблизно в 2 рази менше, ніж на його вході. Цим обмежується допустима довжина кабелю за швидкості передачі менше 100 кбіт/с.

На більш високих частотах допустима довжина кабелю зменшується зі зростанням частоти та обмежується втратами в кабелі та ефектом тремтіння фронту імпульсів. Втрати складаються з падіння напруги на омичному опорі провідників, яке на високих частотах зростає за рахунок витіснення струму до поверхні (скін-ефект) та втрат у діелектриці. Наприклад, ослаблення сигналу в кабелі Belden 9501PVC становить 10 дБ (3,2 рази) на частоті 20 МГц та 0,4 дБ (на 4,7%) на частоті 100 кГц [RS] при довжині кабелю 100 м.

Основні відмінності RS-232, RS-422 та RS-485

Під позначеннями RS-232, RS-422 та RS-485 розуміються інтерфейси для цифрової передачі даних. Стандарт RS-232 більш відомий як звичайний COM порт комп'ютера або послідовний порт (хоча послідовним портом також можна вважати Ethernet, FireWire та USB). Інтерфейси RS-422 та RS-485 широко застосовуються в промисловості для з'єднання різного обладнання.

У таблиці наведено основні відмінності інтерфейсів RS-232, RS-422 та RS-485.

Назва	RS-232	RS-422	RS-485
Тип передачі	Повний дуплекс	Повний дуплекс	Напівдуплекс (2 провода), повний дуплекс (4 провода)
	15 метрів при 9600 бит/с	1200 метрів при 9600 біт/с	1200 метрів при 9600 біт/с
Задіяні контакти	TxD, RxD, RTS, CTS, DTR, DSR, DCD, GND*	TxA, TxB, RxA, RxB, GND	DataA, DataB, GND
Топологія	Точка-точка	Точка-точка	Багатоточкова
Макс, кількість підєднаних пристроїв	1	1 (10 пристрої у режимі приймача)	32 (з повторювачами більше, звичайного до 256)

Параметр	RS-232	RS-422	RS-485
Спосіб передачі сигналу	Однофазний	Диференціальний	Диференціальний

Максимальна кількість приймачів	1	10	32
Максимальна довжина кабелю	15 м	1200 м	1200 м
Максимальна швидкість передачі	460 кбіт/с	10 Мбіт.'с	30 Мбіт/с**
Синфазна напруга на виході	± 25 В	-0,25... ± 6 В	-7.. ± 12 В
Напруга в лінії під навантаженням	± 5 ... ± 15 В	± 2 В	$\pm 1,5$ В
Імпеданс навантаження	3...7 кОм	100 Ом	54 Ом
Струм витоку Е "третьому" стані	-	-	± 100 мкА
Допустимий діапазон сигналів на вході приймача	± 15 В	± 10 В	-7.. ± 12 В
Чутливість приймача	± 3 В	± 200 мВ	± 200 мВ
Вхідний опір приймача	3...7 кОм	4 кОм	>12 кОм

Інформація, що передається за інтерфейсами RS-232, RS-422 та RS-485, структурована у вигляді будь-якого протоколу, наприклад, у промисловості широко поширений протокол Modbus RTU.

Опис інтерфейсу RS-232

Інтерфейс RS-232 (TIA/EIA-232) призначений для організації прийому-передачі даних між передавачем або терміналом (англ. Data Terminal Equipment, DTE) та приймачем або комунікаційним обладнанням (англ. Data Communications Equipment, DCE) за схемою точка-точка .

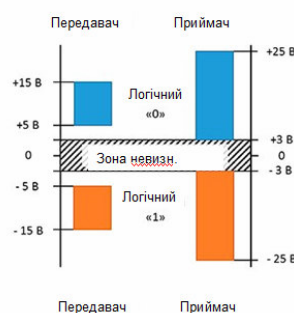
Швидкість роботи RS-232 залежить від відстані між пристроями, зазвичай, на відстані 15 метрів швидкість дорівнює 9600 біт/с. На мінімальній відстані швидкість зазвичай дорівнює 115.2 кбіт/с, але є обладнання, яке підтримує швидкість до 921.6 кбіт/с.

Інтерфейс RS-232 працює в дуплексному режимі, що дозволяє передавати та приймати інформацію одночасно, тому що використовуються різні лінії для прийому та передачі. У цьому полягає відмінність від напівдуплексного режиму, коли використовується одна лінія зв'язку для прийому та передачі даних, що накладає обмеження на одночасну роботу, тому в напівдуплексному режимі в один момент часу можливий прийом або передача інформації.

Інформація по інтерфейсу RS-232 передається у цифровому вигляді логічними 0 та 1.

Логічній "1" (MARK) відповідає напруга в діапазоні від -3 до -15 В.

Логічному "0" (SPACE) відповідає напруга в діапазоні від +3 до +15 В.



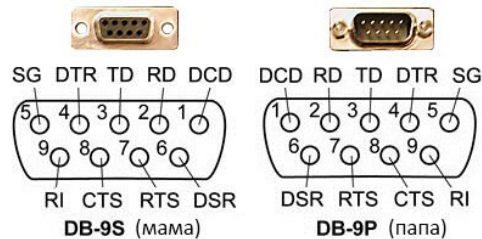
На додаток до двох ліній прийому та передачі, на RS-232 є спеціальні лінії для апаратного керування потоком та інших функцій.

Для підключення до RS-232 використовується спеціальний роз'єм D-sub, зазвичай 9 контактний DB9, рідше застосовується 25 контактний DB25.

Рознімання DB діляться на Male - "тато" (вилка, pin) і Female - "мама" (гніздо, socket).



Розпінання роз'єму DB9 для RS-232



Розпаювання кабелю DB9 для RS-232

Існує три типи підключення пристроїв у RS-232: термінал-термінал DTE-DTE, термінал-комунікаційне обладнання DTE-DCE, модем-модем DCE-DCE.

Кабель DTE-DCE називається "прямий кабель", тому що контакти з'єднуються один до одного.

Кабель DCE-DCE називається "нуль-модемний кабель", або по-іншому крос-кабель.

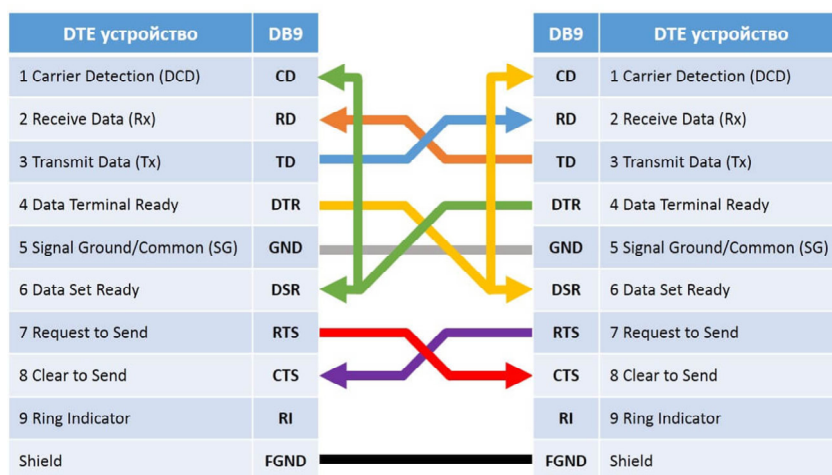
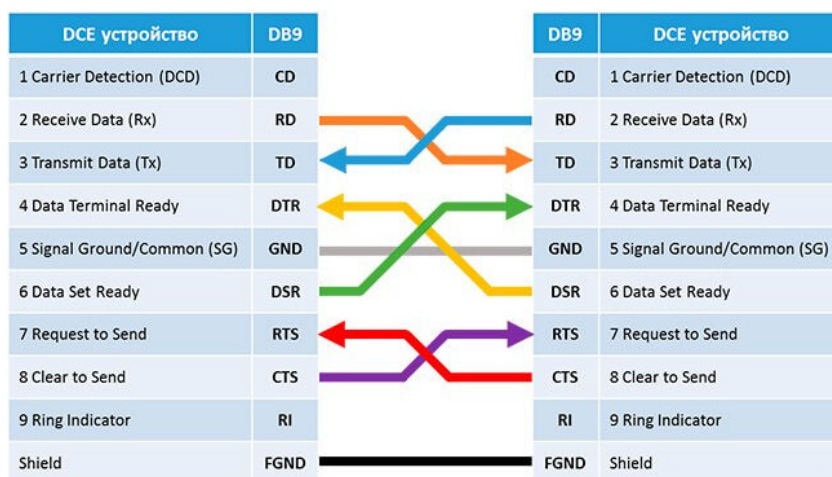
Нижче наведені таблиці розпинок всіх перелічених типів кабелю, і далі окремо представлена таблиця з перекладом основних термінів.

Розпінання прямого кабелю DB9 для RS-232

Термінал-термінал DTE-DTE

DTE компьютер	DB9		DB9	DCE устройство
1 Carrier Detection (DCD)	CD	←	CD	1 Carrier Detection (DCD)
2 Receive Data (Rx)	RD	←	RD	2 Receive Data (Rx)
3 Transmit Data (Tx)	TD	→	TD	3 Transmit Data (Tx)
4 Data Terminal Ready	DTR	→	DTR	4 Data Terminal Ready
5 Signal Ground/Common (SG)	GND	→	GND	5 Signal Ground/Common (SG)
6 Data Set Ready	DSR	←	DSR	6 Data Set Ready
7 Request to Send	RTS	→	RTS	7 Request to Send
8 Clear to Send	CTS	←	CTS	8 Clear to Send
9 Ring Indicator	RI	←	RI	9 Ring Indicator
Shield	FGND	→	FGND	Shield

Розпінання нуль-модемного кабелю DB9 для RS-232



Таблиця 1.1. Із Розпинування роз'ємів DB9 і DB25.

DB9	DB25	Позначення	Назва	Опис
1	8	CD	Carrier Detect	Визначення несучої
2	3	RXD	Receive Data	Прийом даних
3	2	TXD	Transmit Data	Передача даних
4	20	DTR	Data Terminal Ready	Готовність кінцевого обладнання
5	7	GND	System Ground	Загальний провід
6	6	DSR	Data Set Ready	Готовність кінцевого обладнання
7	4	RTS	Request to Send	Запит на передачу даних
8	5	CTS	Clear to Send	Готовність

9

22

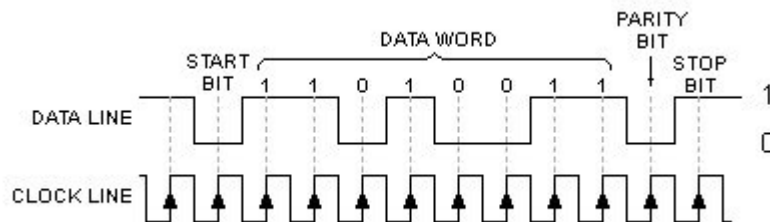
RI

Ring Indicator

передавати
Призначення
сигналу виклику

Для роботи з пристроями RS-232 зазвичай потрібно всього 3 контакти: RXD, TXD і GND. Але деякі пристрої потребують усі 9 контактів для підтримки функції керування потоком даних.

Структура даних, що передаються в RS-232



Одне повідомлення, що передається по RS-232/422/485, складається зі стартового біта, кількох Біт даних, біта парності та стопового біта.

Стартовий біт (start bit) - біт, що означає початок передачі, зазвичай дорівнює 0.

Дані (data bits) – 5, 6, 7 чи 8 Біт даних. Першим бітом є менш значний Біт.

Біт парності (parity bit) – Біт, призначений для перевірки парності. Служить виявлення помилок. Може приймати такі значення:

Парність (EVEN), набуває такого значення, щоб кількість одиниць у повідомленні була парною

Непарність (ODD), набуває такого значення, щоб кількість одиниць у повідомленні була непарною

Завжди 1 (MARK), біт парності завжди дорівнюватиме 1

Завжди 0 (SPACE), біт парності завжди дорівнюватиме 0

Не використовується (NONE)

Стоповий біт (stop bit) – біт, що означає завершення передачі повідомлення, може приймати значення 1, 1.5 (Data bit = 5), 2.

Наприклад, скорочення 8E1 означає, що передається 8 біт даних, використовується парність парності в режимі EVEN і стоп біт займає один біт.

Управління потоком у RS-232

Для того, щоб не втратити дані, існує механізм управління потоком передачі даних, що дозволяє припинити на час передачу даних для запобігання переповнення буфера обміну.

Є апаратний та програмний метод управління.

Апаратний метод використовує висновки RTS/CTS. Якщо передавач готовий надіслати дані, він встановлює сигнал на лінії RTS. Якщо приймач готовий приймати дані, він встановлює сигнал лінії CTS. Якщо один із сигналів не встановлений, то передачі даних не відбудеться.

Програмний метод замість висновків використовує символи Xon і Xoff (в ASCII символ Xon = 17, Xoff = 19) передаються за тими ж лініями зв'язку TXD/RXD, як і основні дані. У разі неможливості приймати дані приймач передає символ Xoff. Для відновлення передачі даних надсилається символ Xon.

Опис інтерфейсу RS-422

Інтерфейс RS-422 нагадує RS-232, т.к. дозволяє одночасно відправляти і приймати повідомлення окремим лініям (повний дуплекс), але використовує при цьому диференціальний сигнал, тобто. різницю потенціалів між провідниками А та В.

Швидкість передачі в RS-422 залежить від відстані і може змінюватися в межах від 10 кбіт/с (1200 метрів) до 10 Мбіт/с (10 метрів).

У мережі RS-422 може бути тільки один передавальний пристрій і до 10 пристроїв, що приймають.

Лінія RS-422 являє собою 4 дроти для приймання-передачі даних (2 скручені проводи для передачі і 2 скручені проводи для прийому) і один загальний провід землі GND.

Скручування проводів (кручена пара) між собою дозволяє позбутися наведень і перешкод, тому що наведення однаково діє на обидва проводи, а інформація витягується з різниці потенціалів між провідниками А і В одній лінії.

Напруга на лініях передачі може бути в діапазоні від -6 до +6 в.

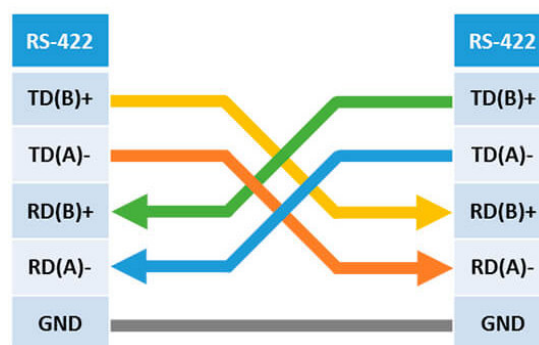
Логічному 0 відповідає різниця між А та В більше +0,2 В.

Логічній 1 відповідає різниця між А і менше -0,2 В.

Стандарт RS-422 не визначає конкретний тип гнізда, зазвичай це може бути клемна колодка або гніздо DB9.

Розпинання RS-422 залежить від виробника пристрою та вказується в документації на нього.

При підключенні пристрою RS-422 необхідно зробити перехрестя між RX і TX контактами, як показано на малюнку.



Тобто відстань між приймачем і передавачем RS-422 може досягати 1200 метрів, для запобігання відображення сигналу від кінця лінії ставиться спеціальний 120 Ом узгоджуючий резистор або "термінатор". Цей резистор встановлюється між RX+ та RX-контактами на початку та в кінці лінії.

Опис інтерфейсу RS-485

У промисловості найчастіше використовується інтерфейс RS-485 (EIA-485), тому що в RS-485 використовується багатоточкова топологія, що дозволяє підключити кілька приймачів та передавачів.

Інтерфейс RS-485 схожий на RS-422 тим, що також використовує диференціальний сигнал для передачі даних.

Існує два типи RS-485:

RS-485 з 2 контактами, працює в режимі напівдуплекс

RS-485 із 4 контактами, працює в режимі повний дуплекс

У режимі повний дуплекс можна одночасно приймати та передавати дані, а в режимі напівдуплекс або передавати, або приймати.

В одному сегменті мережі RS-485 може бути до 32 пристроїв, але за допомогою додаткових повторювачів та підсилювачів сигналів до 256 пристроїв. Одночасно активним може лише один передавач.

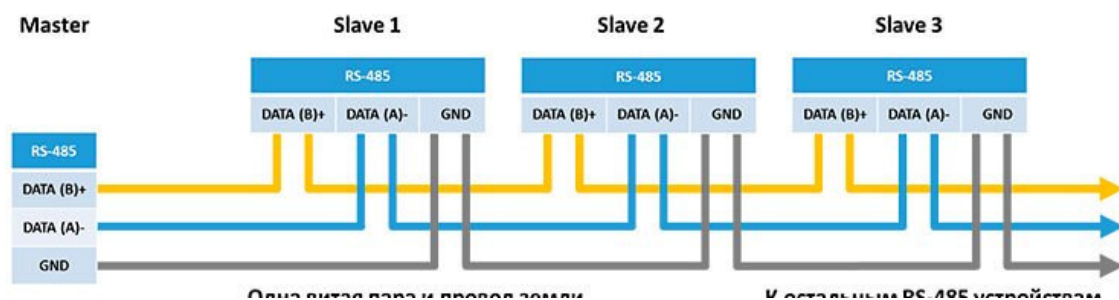
Швидкість роботи також залежить від довжини лінії та може досягати 10 Мбіт/с на 10 метрах.

Напруга на лініях знаходиться в діапазоні від -7 до $+12$ В.

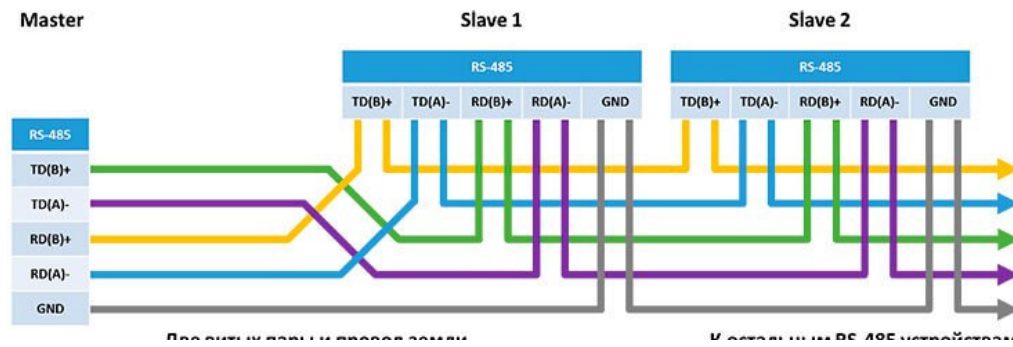
Стандарт RS-485 не визначає конкретний тип роз'єму, але це часто клемна колодка або роз'єм DB9.

Розпинання роз'єму RS-485 залежить від виробника пристрою та вказується в документації на нього.

Підключення RS-485 пристроїв із 2 контактами.



Підключення RS-485 пристроїв із 4 контактами.



Для узгодження лінії на великих відстанях RS-485 також ставлять узгоджувальні резистори 120 Ом на початку і в кінці лінії.

Завдання на лабораторну роботу №1

1. Ознайомитись з основними елементами адаптера асинхронного зв'язку та комунікаційного ПЗ.
2. Вивчити особливості програмування адаптера асинхронного зв'язку для роботи у різних режимах.
3. Налаштувати та протестувати програми, що реалізують алгоритми, задані викладачем (див. пункт "Хід роботи").

Лабораторна робота №2

Розробка комунікаційного програмного забезпечення для фізичного інтерфейсу "струмова петля"

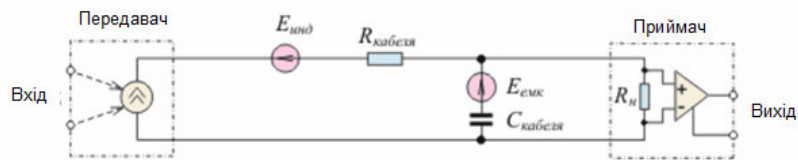
Мета роботи: практичне вивчення інтерфейсу фізичного рівня "струмова петля", а також отримання навичок розробки та використання програмного забезпечення для обміну даними з периферійним пристроєм.

Теоретичні відомості

Інтерфейс "струмова петля"

Інтерфейс "струмова петля" використовується для передачі інформації з 1950-х років. Спочатку в ньому використовувався струм 60 мА; пізніше, з 1962 року, набув поширення інтерфейс зі струмом 20 мА, переважно в телетайпних апаратах. У 1980-х роках почала широко застосовуватися "струмова петля" 4...20 мА у різноманітному технологічному обладнанні, датчиках та виконавчих пристроях засобів автоматики. Популярність "струмової петлі" почала падати після появи стандарту на інтерфейс RS-485 (1983 р.) і в даний час у новому устаткуванні вона практично не застосовується.

У передавачі "струмової петлі" використовується не джерело напруги, як в інтерфейсі RS-485, а джерело струму. За визначенням, струм, що з джерела струму, залежить від параметрів навантаження. Тому в "струмовій петлі" протікає струм, що не залежить від опору кабелю, опору навантаження та е.д.с. індуктивної перешкоди, а також напруги живлення джерела струму. Струм у петлі може змінитися тільки внаслідок витоків кабелю, які дуже малі.



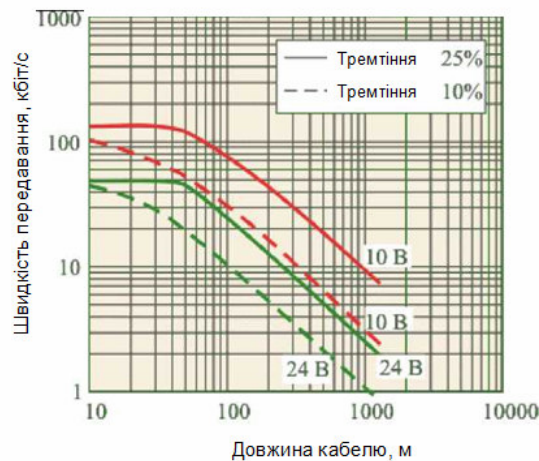
Принцип дії «струмової петлі»

Ця властивість струмової петлі є основною і визначає всі варіанти її застосування. Ємнісне наведення, е.р.с. якої прикладена не послідовно з джерелом струму, а паралельно йому, не може бути ослаблена в "струмовий петлі" і для її придушення слід використовувати екранування.

Як лінія передачі зазвичай використовується екранована кручена пара, яка спільно з диференціальним приймачем дозволяє послабити індуктивну і синфазну перешкоду.

На приймальному кінці струм петлі перетворюється на напругу за допомогою каліброваного опору. При струмі 20 мА для отримання стандартної напруги 2.5, 5 або 10 використовують резистор опором 125 Ом, 250 Ом або 500 Ом відповідно.

Основним недоліком "струмової петлі" є її принципово низька швидкодія, яка обмежується швидкістю заряду ємності кабелю від джерела струму. Наприклад, при типовій ємності кабелю 75 пФ/м і довжині 1 км ємність кабелю складе 75 нФ. Для заряду такої ємності від джерела струму 20 мА до напруги 5 необхідно час 19 мкс, що відповідає швидкості передачі близько 9 кбіт/с. На малюнку нижче наведено залежність максимальної швидкості передачі від довжини кабелю при різних рівнях спотворень (тремтіння), який оцінювався так само, як і для інтерфейсу RS-485.



Залежність максимальної швидкості передачі струмової петлі від довжини неекранованої крученої пари 22 AWG при струмі петлі 20 мА.

Другим недоліком "струмової петлі", що обмежує її практичне застосування, є відсутність стандарту на конструктивне виконання роз'ємів та електричні параметри, хоча фактично стали загальноприйнятими діапазони струмових сигналів 0...20 мА та 4...20 мА; набагато рідше використовують 0...60 мА. У перспективних розробках рекомендується використовувати лише діапазон 4...20 мА, що забезпечує можливість діагностики обриву лінії.

Інтерфейс "струмова петля" поширений у двох версіях: цифровий та аналоговий.

Аналогова "струмова петля". Аналогова версія "струмової петлі" використовується, як правило, для передачі сигналів від різноманітних датчиків до контролера або від контролера до виконавчих пристроїв. Застосування "струмової петлі" в даному випадку дає дві переваги. По-перше, приведення діапазону зміни вимірюваної величини до стандартного діапазону забезпечує взаємозамінність компонентів. По-друге, стає можливим передати сигнал на велику відстань з високою точністю (похибка "струмової петлі" може бути знижена до $\pm 0.05\%$). Крім того, стандарт "струмова петля"

підтримується переважною більшістю виробників засобів промислової автоматизації.

У варіанті "4...20 мА" як початок відліку прийнятий струм 4 мА. Це дозволяє робити діагностику цілісності кабелю (кабель має розрив, якщо струм дорівнює нулю) на відміну від варіанта "0...20 мА", де величина "0 мА" може означати не тільки нульову величину сигналу, а й обрив кабелю. Другою перевагою рівня відліку 4 мА є можливість подачі енергії датчику для живлення.

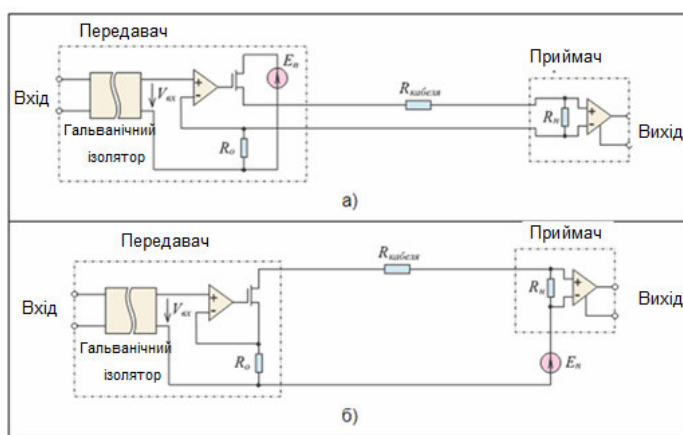


Рисунок 2.21. - Два варіанти побудови аналогової "струмової петлі": із вбудованим у передавач джерелом живлення (а) та виносним (б)

На рисунках вище показано два варіанти побудови аналогової "струмової петлі". У першому варіанті використовується вбудоване незаземлене джерело живлення, у другому варіанті джерело живлення – зовнішнє. Вбудоване джерело зручне при монтажі системи, а зовнішнє зручне тим, що його можна вибрати з будь-якими параметрами в залежності від поставленого завдання.

Принцип дії обох варіантів у тому, що з нескінченно великому коефіцієнті посилення операційного підсилювача (ОП) напруга між його входами дорівнює нулю і тому струм через резистор R_0 дорівнює $V_{вх} / R_0$, а оскільки у ідеального ОП

струм входів дорівнює нулю, то струм через резистор строго дорівнює струму в петлі $I = V_{\text{вх}} / R_0$ і, як випливає з цієї формули, не залежить від опору навантаження. Тому напруга на виході приймача визначається як $I R_H = (R_H / R_0) V_{\text{вх}}$.

Перевагою схеми з операційним підсилювачем є можливість калібрування передавача без підключеного до нього кабелю і приймача, оскільки похибка, що вноситься ними, зневажливо мала.

Напруга джерела E_n вибирається такий, щоб забезпечити роботу транзистора передавача в активному (ненасиченому) режимі та компенсувати падіння напруги на проводах кабелю та опорах R_0 , R_H . Для цього вибирають $E > I * (R_0 + R_{\text{кабеля}} + R_H) + V_{\text{нас}}$, де $V_{\text{нас}}$ - напруга насичення транзистора (1...2 В). Наприклад, при типових значеннях $R_0 = R_H = 500$ Ом та опорі кабелю 100 Ом (при довжині 1 км) отримуємо напругу джерела живлення петлі 22 В; найближче стандартне значення дорівнює 24 В. Зазначимо, що потужність, пов'язана з надмірною напругою джерела живлення в порівнянні з розрахованим значенням, розсіюватиметься на транзисторі, що особливо істотно для інтегральних передавачів, що не мають тепловідведення.

Гальванічна розв'язка між входом передавача і каскадом, що передає, необхідна для виключення паразитних зв'язків між передавачем і приймачем.

Цифрова "струмова тепла". Цифрова "струмова петля" використовується зазвичай у версії "0...20 мА", оскільки вона реалізується набагато простіше, ніж "4...20 мА". Оскільки при цифровій передачі даних точність передачі логічних рівнів ролі не відіграє, можна використовувати джерело струму з невеликим внутрішнім опором та низькою точністю. Так, на малюнку нижче при стандартному значенні напруги живлення $E_n = 24$ В і падінні напруги на вході приймача 0.8 для отримання струму 20 мА опір повинен дорівнювати

приблизно 1.2 кОм. Опір кабелю перетином 0,35 кв. мм і довжиною 1 км дорівнює 97 Ом, що становитиме всього 10% від загального опору петлі і їх можна знехтувати. Падіння напруги на діоді оптрона становить 3.3% від напруги джерела живлення, і його вплив на струм у петлі також можна знехтувати. Тому з достатньою для практики точністю вважатимуться, що передавач у цій схемою є джерелом струму.

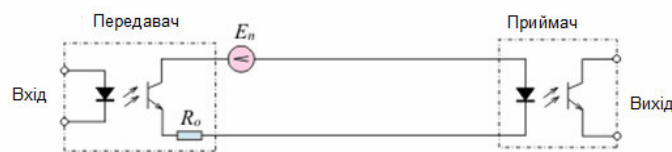


Рисунок 2.2 - Принцип реалізації цифрової "струмової петлі"

Як аналогова, і цифрова "струмова петля" може використовуватися передачі інформації кільком приймачам одночасно. Внаслідок низької швидкості передачі інформації "струмною петлею" узгодження довгої лінії з передавачем і приймачем не потрібно.

Завдання на лабораторну роботу №2

1. Ознайомитись з основними елементами адаптера синхронного зв'язку та комунікаційного ПЗ.
2. Вивчити особливості програмування адаптера синхронного зв'язку для роботи у різних режимах.
3. Налаштувати та протестувати програми, що реалізують алгоритми, задані викладачем (див. пункт "Хід роботи").

Лабораторна робота №3

Розробка комунікаційного ПЗ для фізичного інтерфейсу, вивчення промислового протоколу MODBUS

Метою роботи: практичне вивчення протоколу обміну даними Modbus та його програмної реалізації поверх RS-232C та RS-485 для зв'язку пристроїв Master-Slave.

Теоретичні відомості

Modbus

Протокол Modbus та мережа Modbus є найпоширенішими у світі. Незважаючи на свій вік (стандартом де-факто Modbus став ще 1979 року), Modbus не лише не застарів, але, навпаки, суттєво зросла кількість нових розробок та обсяг організаційної підтримки цього протоколу. Мільйони Modbus-пристроїв у всьому світі продовжують успішно працювати, а остання версія опису протоколу з'явилася у грудні 2006 р.

Однією з переваг Modbus є відсутність потреби у спеціальних інтерфейсних контролерах (Profibus та CAN вимагають для своєї реалізації замовні мікросхеми), простота програмної реалізації та елегантність принципів функціонування. Все це знижує витрати на освоєння стандарту системними інтеграторами, так і розробниками контролерного обладнання. Високий ступінь відкритості протоколу забезпечується повністю безкоштовними текстами стандартів, які можна завантажити з сайту www.modbus.org.

У Росії Modbus за поширеністю конкурує лише з Profibus. Популярність протоколу нині пояснюється, передусім, сумісністю із великою кількістю устаткування, що має протокол Modbus. Крім того, Modbus має високу достовірність передачі, пов'язану із застосуванням надійного методу

контролю помилок. Modbus дозволяє уніфікувати команди обміну завдяки стандартизації номерів (адрес) регістрів та функцій їх читання-запису.

Основним недоліком Modbus є мережевий обмін за типом "провідний/відомий", що не дозволяє веденим пристроям передавати дані в міру їх появи і тому потребує інтенсивного опитування провідних ведучих пристроїв.

Різновидами Modbus є протоколи Modbus Plus [Modicon] - багатомайстерний протокол із кільцевою передачею маркера та Modbus TCP [Modbus], розрахований на використання в мережах Ethernet та інтернет.

Протокол Modbus має два режими передачі: RTU (Remote Terminal Unit – «віддалений термінальний пристрій») та ASCII. Стандарт передбачає, що режим RTU в протоколі Modbus повинен бути обов'язково, а режим ASCII є опціональним. Користувач може вибирати будь-який з них, але всі модулі, включені в мережу Modbus, повинні мати той самий режим передачі.

Ми розглянемо лише протокол Modbus RTU, оскільки Modbus ASCII у Росії практично не використовується. Зазначимо, що Modbus ASCII не можна плутати з приватно-фірмовим протоколом DCON, який використовується у модулях фірм Advantech та ICP DAS і не відповідає стандарту Modbus.

Стандарт Modbus передбачає застосування фізичного інтерфейсу RS-485, RS-422 чи RS-232. Найбільш поширеним для організації промислової мережі є 2-провідний інтерфейс RS-485. Для з'єднань точка-точка можна використовувати інтерфейс RS-232 або RS-422.

У стандарті Modbus є обов'язкові вимоги, рекомендовані та опціональні (необов'язкові). Існує три ступеня відповідності стандарту: «повністю відповідає» – коли протокол відповідає

всім обов'язковим та всім рекомендованим вимогам, «умовно відповідає» – коли протокол відповідає лише обов'язковим вимогам і не відповідає рекомендованим, і «не відповідає».

Модель OSI протоколу Modbus містить три рівні: фізичний, каналний та прикладний.

Таблиця 3.1. Модель OSI для Modbus

Номер рівня	Назва рівня	Реалізація
7	Прикладний	MODBUS Application Protocol
6	Рівень представлення	Ні
5	Сеансовий	Ні
4	Транспортний	Ні
3	Мережевий	Ні
2	Канальний (передачі даних)	Протокол "ведунцш/відомий" Режими RTU та ASCII
1	Фізичний	I RS-485 або RS-232

Фізичний рівень

У нових розробках на основі Modbus стандарт рекомендує використовувати інтерфейс RS-485 із двопровідною лінією передачі, але допускається застосування чотирипровідної лінії та інтерфейсу RS-232.

Modbus-шина повинна складатися з одного магістрального кабелю, від якого можуть бути зроблені відводи. Магістральний кабель Modbus повинен містити 3 провідники в загальному екрані, два з яких є кручена пара, а третій з'єднує загальні ("земляні") висновки всіх інтерфейсів RS-485 в мережі. Загальний провід та екран мають бути заземлені в одній точці, бажано біля провідного пристрою.

Пристрої можуть підключатися до кабелю трьома способами:

- безпосередньо до магістрального кабелю;

- через пасивний розгалужувач (трійник);

- через активний розгалужувач (що містить розв'язуючий повторювач інтерфейсу).

У документації на пристрій і на трійник повинні бути вказані найменування ланцюгів, що підключаються.

На кожному кінці магістрального кабелю повинні бути встановлені резистори для узгодження лінії передачі, як це потрібно для RS-485 інтерфейсу (див. вище). На відміну від фізичного інтерфейсу RS-485, у якому термінальні резистори на низьких швидкостях обміну можна використовувати, стандарт на протокол Modbus формально вимагає застосування термінальних резисторів всім швидкостям обміну. Їх номінал може дорівнювати 150 Ом і потужність 0,5 Вт. Термінальні резистори, а також резистори, що усувають невизначеність стану лінії при високоомному стані передавачів, встановлюються так, як описано в розділі "Інтерфейси RS-485, RS-422 і RS-232". Стандарт вимагає, щоб у посібниках з експлуатації пристроїв Modbus було сказано, чи вказані резистори всередині пристрою, або їх необхідно встановлювати при монтажі мережі. Якщо необхідні зовнішні резистори, то вони повинні мати номінал в інтервалі від 450 до 650 Ом і бути встановлені тільки в одному місці в межах кожного сегмента мережі (сегментами вважаються частини мережі між повторювачами інтерфейсу).

Modbus-пристрій обов'язково має підтримувати швидкості обміну 9600 біт/с та 19200 біт/с, з них 19200 біт/с встановлюється "за умовчанням". Допускаються також швидкості 1200, 2400, 4800,...,38400 біт/с, 65 кбіт/с, 115 кбіт/с,... .

Швидкість передачі повинна витримуватися в передавачі з похибкою не гірше 1%, а приймач повинен приймати дані при відхиленні швидкості передачі до 2%.

Сегмент мережі, що не містить повторювачів інтерфейсу, повинен допускати підключення до 32 пристроїв, проте їх кількість може бути збільшена, якщо це допустимо виходячи з здатності навантаження передавачів і вхідного опору приймачів, які повинні бути приведені в документації на інтерфейси. Вказівка цих параметрів документації є обов'язковою вимогою стандарту.

Максимальна довжина магістрального кабелю при швидкості передачі 9600 біт/с та перерізі жила понад 0,13 кв. мм (AWG26) складає 1 км. Відведення від магістрального кабелю не повинні бути довшими за 20 м. При використанні багатопортового пасивного розгалужувача з N відводами довжина кожного відводу не повинна перевищувати значення 40 м/N.

Modbus не встановлює конкретних типів роз'ємів, але якщо використовуються роз'єми RJ45, mini-DIN або D-Shell, вони мають бути екранованими, а цоколівки повинні відповідати стандарту.

Для мінімізації помилок при монтажі рекомендується використовувати дроти таких кольорів: жовтий – для позитивного виведення RS-485 (на якому встановлюється логічна "1", коли через інтерфейс виводиться логічна "1"); коричневий – для другого виведення інтерфейсу RS-485; сірий – для загального дроту.

Типовим перерізом кабелю є AWG 24 (0,2 кв. мм, діаметр дроту 0,51 мм). При використанні кабелю категорії 5 його довжина має перевищувати 600 м. Хвильовий опір кабелю бажано вибирати понад 100 Ом, особливо швидкості обміну понад 19200 біт/с.

Канальний рівень

Протокол Modbus передбачає, що тільки один провідний пристрій (контролер) і до 247 ведених (модулів введення-виведення) можуть бути об'єднані в промислову мережу. Обмін даними завжди ініціюється провідним. Ведені пристрої ніколи не починають передачу даних, доки не отримають запит від ведучого. Ведомі пристрої також можуть обмінюватися даними друг з одним. Тому будь-якої миті часу в мережі Modbus може відбуватися лише один акт обміну.

Адреси з 1 до 247 є адресами Modbus пристроїв у мережі, а з 248 до 255 зарезервовані. Ведучий пристрій не повинен мати адреси та в мережі не повинно бути двох пристроїв з однаковими адресами.

Провідний пристрій може надсилати запити всім пристроям одночасно (широкомовний режим) або тільки одному. Для широкомовного режиму зарезервовано адресу "0" (при використанні команди цієї адреси вона приймається всіма пристроями мережі).

Опис кадру (фрейму) протоколу Modbus

У протоколі Modbus RTU повідомлення починає сприйматися як нове після паузи (тиші) на шині тривалістю щонайменше 3,5 символів (14 біт), т. е. величина паузи за секунди залежить від швидкості передачі.

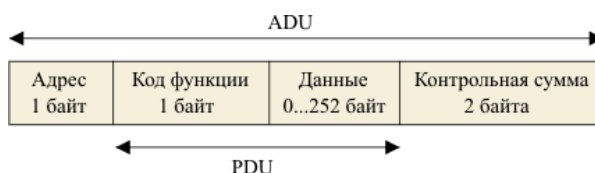


Рисунок 3.1 - Формат кадру протоколу Modbus RTU; PDU - "Protocol Data Unit" - "елемент даних протоколу"; ADU - "Application Data Unit" - "елемент даних програми"

Поле адреси завжди містить лише адресу веденого пристрою, навіть у відповідях команду, надіслану ведучим. Завдяки цьому провідний пристрій знає, від якого модуля надійшла відповідь.

Поле "Код функції" говорить модулю про те, яку дію потрібно виконати.

Поле "Дані" може містити довільну кількість байт. У ньому може бути інформація про параметри, які використовуються в запитах контролера або відповіді модуля.

Поле "Контрольна сума" містить контрольну суму CRC довжиною 2 байти.

Структура даних у режимі RTU

У режимі RTU дані передаються вперед молодшими розрядами.

За замовчуванням в RTU режимі біт паритету встановлюють рівним 1, якщо кількість двійкових одиниць у байті непарне, і рівним 0, якщо воно парне. Такий паритет називають парним (even parity) та метод контролю називають контролем парності.

Стартовий біт	1 МЗР	2	3	4	5	6	7	8	Бит паритета	Стоп-біт
---------------	-------	---	---	---	---	---	---	---	--------------	----------

Рисунок 3.2 - Послідовність бітів у режимі RTU; МЗР – молодший значний розряд. За відсутності біта паритету на його місце записується другий стоп-біт

При парній кількості двійкових одиниць у байті біт паритету може дорівнювати 1. У цьому випадку кажуть, що паритет є непарним (odd parity).

Контроль парності може бути відсутнім взагалі. У цьому випадку замість біту паритету має використовуватися другий стоповий біт. Для забезпечення максимальної сумісності з

іншими продуктами рекомендується використовувати заміну біта паритету на другий стоповий біт.

Ведені пристрої можуть сприймати будь-який з варіантів: парний, парний паритет або його відсутність.

Структура Modbus RTU повідомлення

Повідомлення Modbus RTU передаються у вигляді кадрів, кожному з яких відомо початок і кінець. Ознакою початку кадру є пауза (тиша) тривалістю щонайменше 3,5 шістнадцяткових символів (14 біт). Кадр повинен передаватися безперервно. Якщо при передачі кадру виявляється пауза тривалістю більше 1,5 шістнадцяткових символу (6 біт), то вважається, що кадр містить помилку і повинен бути відхилений приймаючим модулем. Ці величини пауз повинні суворо дотримуватися при швидкостях нижче 19200 біт/с, проте при більш високих швидкостях рекомендується використовувати фіксовані паузи, 1,75 мс і 750 мкс відповідно.

Контроль помилок

У режимі RTU є два рівні контролю помилок у повідомленні:

- контроль паритету для кожного байта (опційно);

- контроль кадру загалом з допомогою CRC методу.

метод CRC використовується незалежно від перевірки паритету. Значення CRC встановлюється у провідному пристрої перед передачею. При прийомі повідомлення обчислюється CRC всього повідомлення і порівнюється з його значенням, зазначеним у полі CRC кадру. Якщо обидва значення збігаються, вважається, що повідомлення не містить помилки.

Стартові, стопові біти та біт паритету у обчисленні CRC не беруть участі.

Прикладний рівень

Прикладний рівень Modbus RTU версії 1.1a описаний у [Modbus]. Він забезпечує комунікацію між пристроями типу "провідний/відомий". Прикладний рівень є незалежним від фізичного та канального, зокрема він може використовувати протоколи Ethernet TCP/IP (Modbus TCP/IP), Modbus Plus (багатомайстерна мережа з передачею маркера), інтерфейси RS-232, RS-422, RS-485, оптоволоконні, радіоканали та інші фізичні середовища передачі сигналів.

Прикладний рівень Modbus ґрунтується на запитах за допомогою кодів функцій. Код функції вказує веденому пристрою, яку операцію він має виконати.

При використанні протоколу прикладного рівня з різними протоколами транспортного та канального рівня зберігається незмінним основний блок Modbus-повідомлення, що включає код функції та дані (цей блок називається PDU - "Protocol Data Unit" - "елемент даних протоколу"). До блоку PDU можуть додаватися додаткові поля під час використання їх у різних промислових мережах і він називається "ADU" - "Application Data Unit" – "елемент даних програми".

Протокол передачі даних визначає структуру мови або формат повідомлення, однаковий для всіх пристроїв у мережі. Протокол необхідний функціонування системи; він визначає, як головний і підлеглий створюють і розривають з'єднання, як маркуються відправник і одержувач, як будується чергу обміну повідомленнями і як виявляються помилки. Протокол управляє циклом запиту та відповіді, який має місце між головними та підлеглими пристроями, як показано на рис.

Головний

Підлеглий

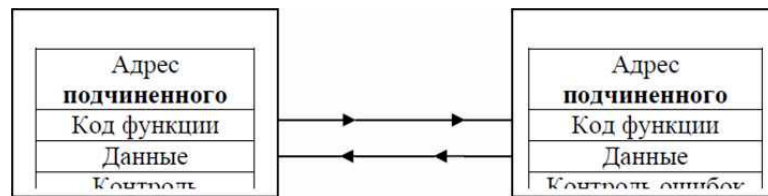


Рисунок 3.3 - Цикл запиту/відповіді головного та підлеглого

Протокол підтримує одного головного та до 247 підлеглих на одній лінії. Хоча протокол може підтримувати до 247 підлеглих, певні обмеження пристроїв можуть знизити кількість підлеглих до числа меншого, ніж 247. Кожному підлеглому відводиться фіксована адреса пристрою в межах від 1 до 247.

Тільки головний може розпочати транзакцію. Транзакції можуть бути типу запит/відповідь (адресується лише один підлеглий) або типу розсилання/немає відповіді (адресуються всі підлеглі). Транзакція може включати кадр запиту і відповіді або кадр розсилки.

Певні характеристики Modbus протоколу є фіксованими, такі як формат кадру, черговість кадрів, обробка помилок зв'язку та виняткових ситуацій та функції, що виконуються.

Інші характеристики визначаються користувачем. У тому числі канал передачі, швидкість передачі, біт парності, число стопових біт і режими передачі (ASCII або RTU). Параметри користувача встановлюються (програмно або апаратно) на кожній станції. Ці параметри не можуть бути змінені у процесі роботи системи.

Для того щоб апаратура надсилала повідомлення інформаційними каналами, повідомлення має утримуватися в конверті. Конверт залишає апаратуру через порт і доставляється адресату лінії зв'язку. У цьому випадку, Modbus протокол забезпечує конверт у формі кадрів повідомлень. Повідомлення містить: адресу одержувача, команди для

одержувача, дані, необхідні для виконання дій та спосіб перевірки помилок.

Коли повідомлення досягає підлеглого, воно входить у цей пристрій через такий самий порт, як і в головного. Пристрій-адресат видаляє конверт, читає повідомлення зв. якщо не було помічено жодних помилок, виконує завдання. Потім воно поміщає повідомлення збережений конверт і повертає його відправнику. У відповідь повідомлення містить адресу підлеглого, виконану дію, дані, отримані в результаті виконання дії та спосіб перевірки помилок. Повідомлення не надсилається, якщо отримане повідомлення є розсилкою (повідомленням всім підлеглим), адреса О означає розсилку повідомлення.

Пристрій-одержувач пише та посилає іншу відповідь, якщо отримане повідомлення помилкове. У більшості випадків головний може надіслати ще одне повідомлення будь-якому підлеглому як тільки він отримає достовірну відповідь або після певного користувачем інтервалу, якщо не отримано жодної відповіді. Усі повідомлення можуть надсилатися як запити, які викликають відповіді підлеглих. Тільки ті повідомлення, які не вимагають відповіді для виконання їх функцій, можуть бути надіслані як розсилальні. Такими повідомленнями є:

- Змінити стан виходів;
- Змінити вміст регістру;
- Встановити кілька виходів.
- Встановити кілька регістрів.
- підфункції Перевірки з шлейфу та програмування.

Режими передачі Режим передачі – це структура окремих одиниць інформації всередині повідомлення та система обчислення, яка використовується для передачі даних. У системі Modbus можливі два режими передачі. Обидва

режими мають однакові можливості комунікації з підлеглими: режим вибирається в залежності від обладнання, що використовується як головне. У системі може використовуватися лише один режим. Змішування режимів не дозволяється. Режими називаються ASCII (American Standard Code for Information Interchange) та RTU (Remote Terminal Unit).

Коди функцій Стандартом Modbus передбачено три категорії кодів функцій: встановлені стандартом, які задаються користувачем і зарезервовані.

Коди функцій є числами в діапазоні від 1 до 127. Коди в діапазоні від 65 до 72 і від 100 до 110 відносяться до функцій, що задаються користувачем, в діапазоні від 128 до 255 зарезервовані для пересилання кодів помилок у повідомленні. Код "0" не використовується.

Коди помилок використовуються провідним пристроєм, щоб визначити, яку дію зробити для їх обробки. Значення кодів та їх зміст описані в стандарті Modbus RTU [Modbus].

Поле даних у повідомленні, надісланому від провідного пристрою веденому, містить додаткову інформацію, яку кероване використовує, щоб виконати функцію, вказану в полі код функції. Поле даних може містити значення станів дискретних входів/виходів, адреси регістрів, з яких треба зчитувати (записувати) дані, кількість байт даних, посилення на змінні, кількість змінних, код підфункцій тощо.

Якщо ведений нормально виконав прийняту від провідного функцію, то у відповіді поле «код функції» містить ту ж інформацію, що й у запиті. В іншому випадку ведений видає код помилки. У разі помилки код функції відповіді дорівнює коду функції в запиті, збільшеному на 128.

Зміст поля даних У повідомленні ведучого пристрою ведене поле даних містить додаткову інформацію, необхідну

для виконання зазначеної функції. Наприклад, якщо код функції вказує, що необхідно вважати дані групи регістрів пристрою введення (код функції 03 hex), то поле даних містить адресу початкового регістра і кількість регістрів. Якщо провідний пристрій посилає команду запису даних до групи регістрів (код функції 10 hex), то поле даних має містити адресу початкового регістру, кількість регістрів, кількість байтів даних та дані для запису в регістр.

Конкретний зміст поля даних встановлюється стандартом кожної функції окремо.

У деяких повідомленнях, поле даних може мати нульову довжину.

1.3.4 Модель даних

Одне з типових застосувань протоколу – читання та запис даних у регістри контролерів. Специфікація протоколу визначає чотири таблиці даних:

Таблиця	Тип елемента	Тип доступу
Дискретні входи (Discrete Inputs)	один бит	Тільки зчитування
Регистри флагів (Coils)	один бит	Зчитування і запис
Регистри вводу (Input Registers)	16-бітове слово	Тільки зчитування
Регистри зберигання (Holding Registers)	16-бітове слово	Зчитування і запис

Доступ до елементів у кожній таблиці здійснюється за допомогою 16-бітної адреси, першому осередку відповідає адреса 0. Таким чином, кожна таблиця може містити до 65536 елементів. Специфікація не визначає, що фізично повинні бути елементами таблиць і за якими внутрішніми адресами пристрою вони повинні бути доступні. Наприклад, допустимо організувати таблиці, що перекриваються. У цьому випадку

команди, що працюють з дискретними даними і з 16-бітними регістрів, будуть фактично звертатися до тих самих даних.

Слід зазначити, що із способом адресації даних пов'язана певна плутанина. Modbus спочатку був розроблений для контролерів Modicon. У цих контролерах кожної з таблиць використовувалася спеціальна нумерація. Наприклад, першому регістру введення відповідав номер комірки 30001, а першому регістру зберігання - 40001. Таким чином, регістру зберігання з адресою 107 команді Modbus відповідав регістр № 40108 контролера. Хоча така відповідність адрес більше не є частиною стандарту, деякі програмні пакети можуть автоматично «коригувати» адреси, що вводяться користувачем, наприклад, віднімаючи 40001 з адреси регістра зберігання.

Стандартні функції протоколу Modbus

PDU запити і відповіді для стандартних функцій

Номер функції	Запит/відповідь					
1 (0x01)	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀		
	N	D (N байт)				
2 (0x02)	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀		
	N	D (N байт)				
3 (0x03)	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀		
	N	D (N байт)				
4 (0x04)	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀		
	N	D (N байт)				
5 (0x05)	A ₁	A ₀	D ₁	D ₀		
	A ₁	A ₀	D ₁	D ₀		
6 (0x06)	A ₁	A ₀	D ₁	D ₀		
	A ₁	A ₀	D ₁	D ₀		
15 (0x0F)	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀	N	D (N байт)
	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀		
16 (0x10)	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀	N	D (N байт)
	A ₁	A ₀	Q ₁	Q ₀		

A₁ і A₀ - адреса елемента,

Q1 і Q0 - кількість елементів,

N - кількість байт даних

D - дані

Читання даних

Для читання значень із перелічених вище таблиць даних використовуються функції з кодами 1-4 (шістнадцяткові значення 0x01-0x04):

1 (0x01) - читання значень з кількох регістрів прапорів (Read Coil Status)

2 (0x02) - читання значень з кількох дискретних регістрів (Read Discrete Inputs)

3 (0x03) - читання значень з кількох регістрів зберігання (Read Holding Registers)

4 (0x04) - читання значень з кількох регістрів введення (Read Input Registers)

Запит складається з адреси першого елемента таблиці, значення якого потрібно прочитати, і кількості елементів, що зчитуються. Адреса та кількість даних задаються 16-бітними числами, старший байт кожного з них передається першим.

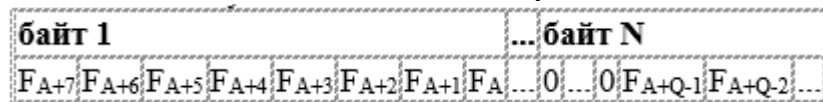
У відповіді передаються запитані дані. Кількість байт даних залежить кількості запрошених елементів. Перед даними передається один байт, значення якого дорівнює кількості байт даних.

Значення регістрів зберігання та регістрів введення передаються починаючи з вказаної адреси, по два байти на регістр, старший байт кожного регістра передається першим:

байт 1	байт 2	байт 3	байт 4	...	байт N-1	байт N
R _{A,1}	R _{A,0}	R _{A+1,1}	R _{A+1,0}	...	R _{A+Q-1,1}	R _{A+Q-1,0}

зображення Значення прапорів та дискретних входів передаються в упакованому вигляді: по одному біту на прапор. Одиниця означає включений стан, нуль - вимкнений. Значення запитаних прапорів заповнюють спочатку перший байт, починаючи з молодшого біта, потім наступні б, також від

молодшого біта до старших. Молодший біт першого байта даних містить значення прапора, вказаного у полі адресу. Якщо запрошено кількість прапорів, не кратну восьми, значення зайвих бітів заповнюються нулями:



Запис одного значення

5 (0x05) - запис значення одного прапора (Force Single Coil)

6 (0x06) - запис значення в один регістр зберігання (Preset Single Register)

Команда складається з адреси елемента (2 байти) і значення (2 байти), що встановлюється.

Для регістра зберігання значення є просто 16-бітовим словом.

Для прапорів значення 0xFF00 означає стан, 0x0000 — вимкнене, інші значення неприпустимі.

Якщо команда виконана успішно, керований пристрій повертає копію запиту.

Запис кількох значень

15 (0x0F) — запис значень у кілька регістрів прапорів (Force Multiple Coils)

16 (0x10) — запис значень у кілька регістрів зберігання (Preset Multiple Registers)

Команда складається з адреси елемента, кількості змінюваних елементів, кількості байт, що передаються, встановлюваних значень і самих встановлюваних значень. Дані упаковуються так само, як і в командах читання даних.

Відповідь складається з початкової адреси та кількості змінених елементів.

Контроль помилок у протоколі Modbus RTU

Під час обміну даними можуть бути помилки двох типів:

помилки, пов'язані з спотвореннями під час передачі даних;

логічні помилки.

Помилки першого типу виявляються за допомогою кадрів символів, контролю парності та циклічної контрольної суми CRC-16-IBM (використовується число-поліном = 0xA001).

RTU кадр у режимі RTU повідомлення має починатися і закінчуватися інтервалом тиші - часом передачі не менше 3.5 символів при даній швидкості в мережі. Першим полем потім передається адресу пристрою.

Слідом за останнім символом, що передається, також слідує інтервал тиші тривалістю не менше 3.5 символів. Нове повідомлення може починатися після інтервалу.

Фрейм повідомлення передається безперервно. Якщо інтервал тиші тривалістю 1.5 виник під час передачі кадру, пристрій повинен ігнорувати цей кадр як неповний.

Таким чином, нове повідомлення повинне починатися не раніше 3.5 інтервалу, т.к. у цьому випадку встановлюється помилка.

Небагато про інтервали (йдеться про Serial Modbus RTU): при швидкості 9600 і 11 бітах у кадрі (стартовий біт + 8 біт даних + біт контролю парності + стоп-біт): $3.5 * 11 / 9600 = 0,00401041(6)$, тобто. понад 4 мс; $1.5 * 11 / 9600 = 0,00171875$, тобто. понад 1 мс. Для швидкостей понад 19200 бод допускається використовувати інтервали 1,75 та 0,75 мс відповідно.

Логічні помилки Для повідомлень про помилки другого типу протокол Modbus RTU передбачає, що пристрої можуть надсилати відповіді, що свідчать про помилкову ситуацію. Ознакою того, що відповідь містить повідомлення про помилку, встановлений старший біт коду команди. Приклад

кадру при виявленні помилки веденим пристроєм у відповідь на запит наведено в (Таблиця).

Якщо Slave приймає коректний запит і може нормально його обробити, то повертає нормальну відповідь.

Якщо Slave не набуває жодного значення, жодної відповіді не надсилається. Master діагностує помилку по таймууту.

Якщо Slave приймає запит, але виявляє помилку (parity, LRC, or CRC), жодної відповіді не надсилається. Master діагностує помилку по таймууту.

Якщо Slave приймає запит, але не може його обробити (звернення до неіснуючого регістру тощо), надсилається відповідь, що містить дані про помилку.

Таблиця 3.3 Скрін відповіді (Slave→Master) при виникненні помилки

Напрямок передання	Адреса підлеглого пристрою	Номер функції	Дані (або код похибки)	CRC
Запит (Slave→Master)	0x01	0x77	0xDD	0xC7 0xA9
Відповідь (Slave→Master)	0x01	0xF7	0xEE	0xE6 0x7C

Стандартні коди помилок

01 Прийнятий код функції не може бути оброблений на підлеглому.

02 Адреса даних, вказана у запиті, не доступна цьому підлеглому.

03 Величина, що міститься в полі даних запиту, не є допустимою величиною для підлеглого.

04 Невідновлена помилка мала місце, поки підлеглий намагався виконати потрібну дію.

05 Підлеглий прийняв запит і опрацьовує його, але це вимагає багато часу.

Ця відповідь захищає головного від створення помилки таймууту.

06 Підлеглий зайнятий опрацюванням команди.

Головний повинен повторити повідомлення пізніше, коли підлеглий звільниться.

07 Підлеглий не може виконати програмну функцію, прийняту у запиті.

Цей код повертається для невдалого програмного запиту, який використовує функції номерів 13 або 14.

Головний повинен запитати діагностичну інформацію чи інформацію про помилки з підлеглого.

08 Підлеглий намагається читати розширену пам'ять, але виявив помилку паритету.

Головний може повторити запит, але зазвичай у таких випадках потрібний ремонт.

Програмну реалізацію протоколу Modbus поверх RS-232 реалізовано, наприклад, у бібліотеці libmodbus.

Спілкування між двома пристроями Master та Slave проілюстровано програмами bandwidth-server-one та bandwidth-client.exe.

Контекст бібліотеки libmodbus для обміну двійковими повідомленнями поверх інтерфейсу RS-232 (Modbus RTU) створюється за допомогою функції `**modbus_****new_**rtu`.

```
modbus_t *modbus_new_rtu( const char *device,  
int baud,  
char parity,
```

```
int data_bit,  
int stop_bit);
```

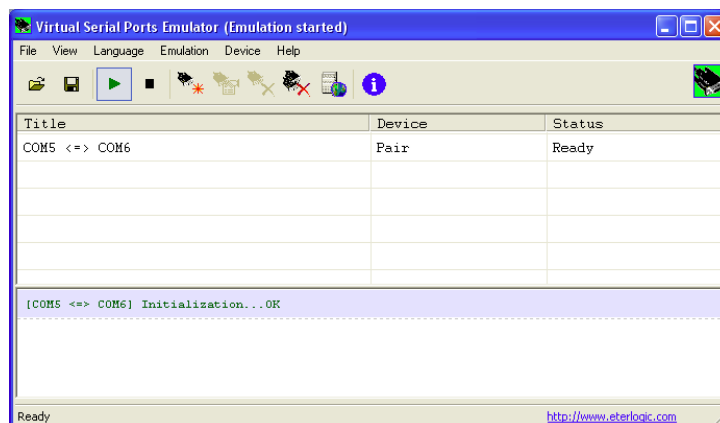
У Windows, необхідно передувати ім'я порту \\.\ для COM, якщо номер менше 9, і \\\\.COM10.

Далі визначається швидкість обміну інформацією: 9600, 19200, 57600, 115 200, etc.

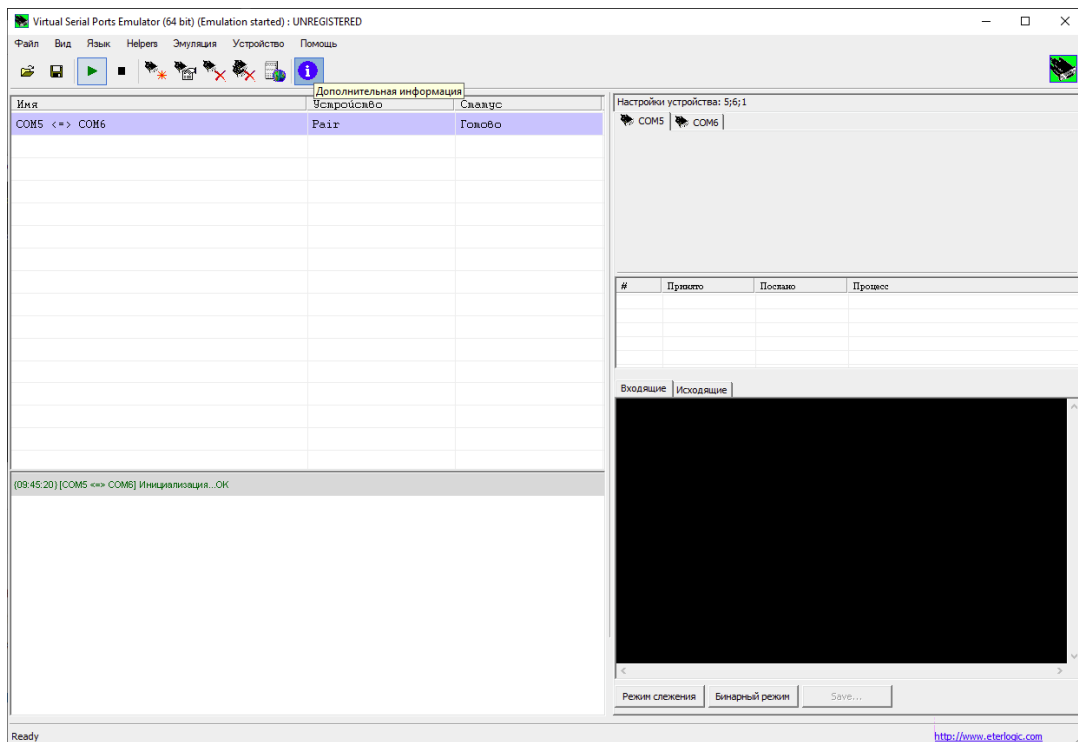
Прапор парності: •N for none •E for even •O for odd
data_bits визначає кількість біт даних у пакеті (5, 6, 7 або 8)
stop_bits визначає кількість стоп-бітів (1 або 2).

Завдання на лабораторну роботу №3

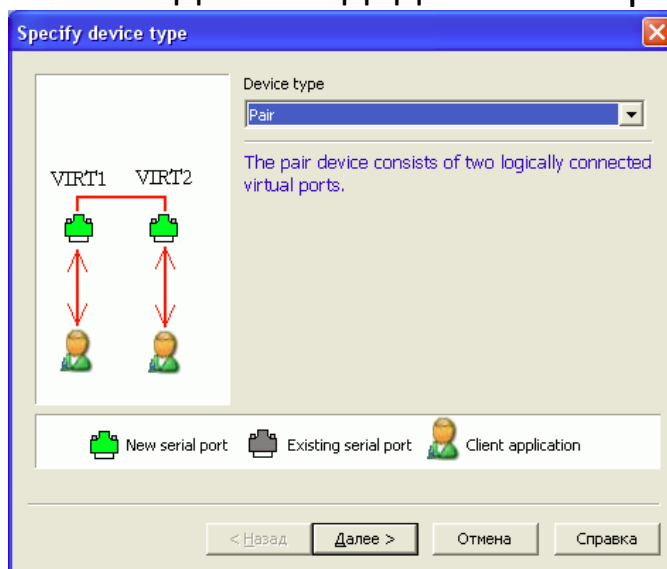
1. За допомогою програми Virtual Serial Ports Emulator необхідно створити пару віртуальних портів із іменами COM5 і COM6



Головне вікно програми



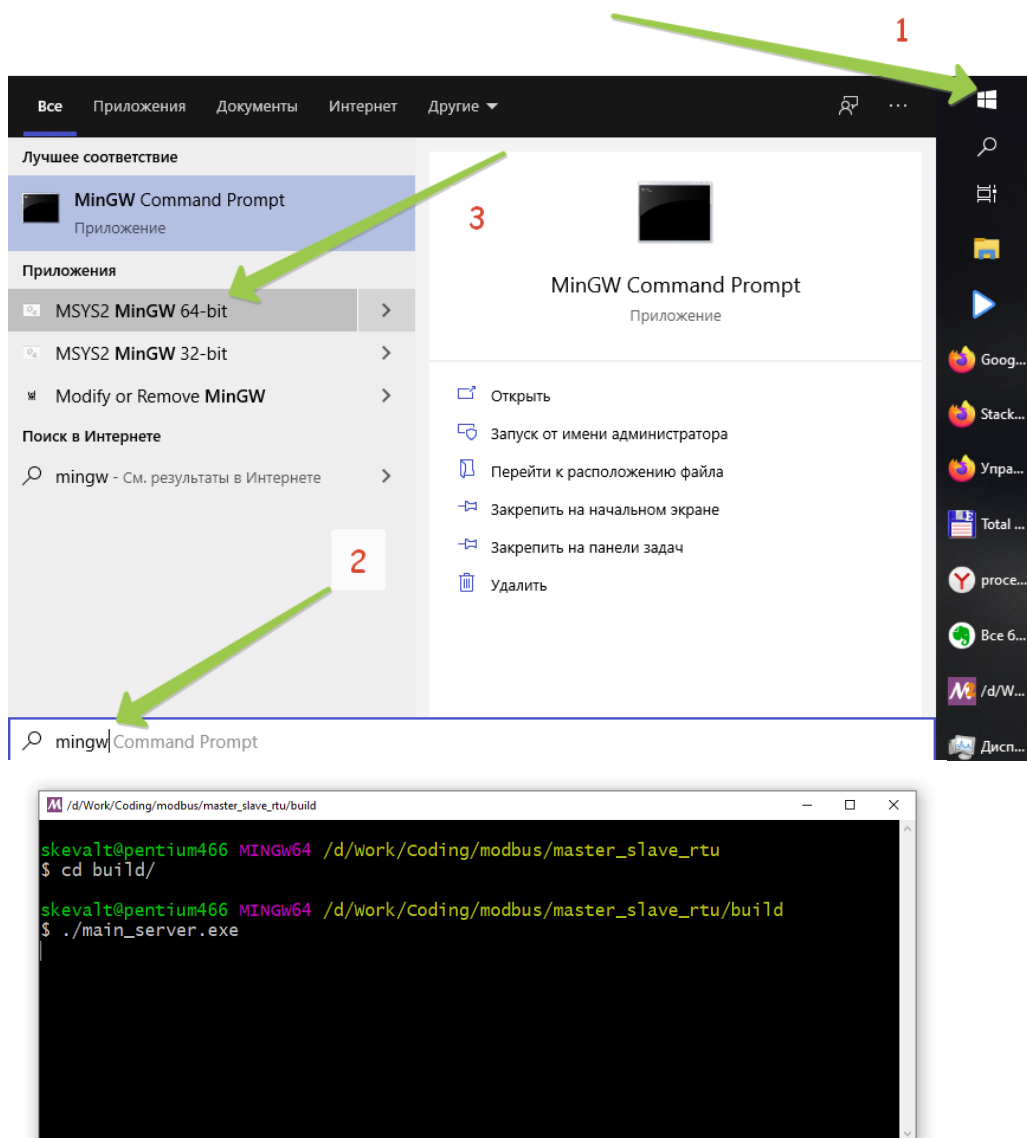
Режим із виведенням додаткової інформації



Діалог створення пари пов'язаних віртуальних портів

2. Протестувати програму обміну текстовими даними server та client

Запустити програму Lab_2\master_slave_rtu\build\main_server.exe. Для цього рекомендується відкрити два вікна терміналу (послідовність дій 1-2-3 для відкриття одного вікна)



Якщо побачили, що програма запустилася, але нічого не виводить на екран терміналу, то діємо, додаючи код у тіло main (у заготовках вже додав), і перекомпілюючи:

```
setvbuf(stdout, NULL, _IONBF, 0);
```

Запустити програму
Lab_2\master_slave_rtu\build\main_client.exe

Здійснити обмін інформацією між двома програмами через пов'язану пару віртуальних портів.

Проаналізувати вихідний код кожної програми та винести у звіт вихідний код, який відповідає за процедуру підключення до портів та обміну інформацією.

3. Модернізувати клієнт і сервер так, щоб можна було здійснювати відсилання 3 цілих чисел і 3 дійсних чисел. Звернути увагу до порядку байт багатобаштового числа. Використовувати об'єднання та бітові поля для запакування-розпакування цілих і речових числа float в масив байт.

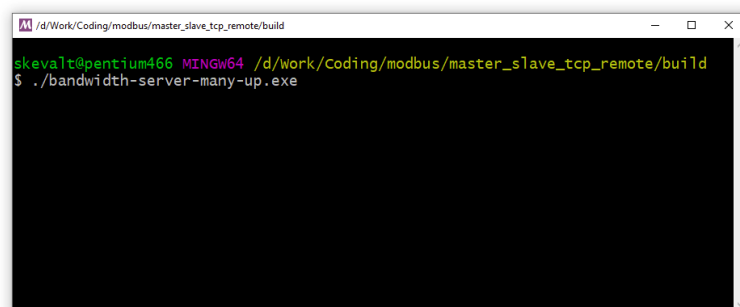
4. Розробити програму циклічного опитування одного регістра джерела з адресою 14 у форматі RTU.

5. Розробити програму циклічного опитування 16 регістрів джерела з адресою 14 у форматі RTU.

6. Використовуючи вихідники з лабораторної роботи №1, спробувати реалізувати симплексний чат.

7. Реалізувати роботу клієнт-серверної програми п. 5 (циклічне опитування регістрів) через Modbus-TCP. Для цього скористатись вихідниками з директорії Lab_2\master_slave_tcp

8. Реалізувати підключення до віддаленого сервера, проаналізувати швидкість роботи, час роботи та обсяги даних, що пересилаються. Додати до коду клієнта ПІБ та групу Сервер bandwidth-server-many-up.exe з запущено у викладача



```
/d/Work/Coding/modbus/master_slave_tcp_remote/build
skevalt@pentium466 MINGW64 /d/work/coding/modbus/master_slave_tcp_remote/build
$ ./bandwidth-server-many-up.exe
```

Вам необхідно запускати модифікований bandwidth-client.exe та результат роботи вставити у звіт. Зверніть увагу на рядок

IVT RULEZZ

до неї необхідно доповнити номер групи та свої ПІБ

```
/d/Work/Coding/modbus/master_slave_tcp_remote/build
skevalt@pentium466 MINGW64 /d/Work/Coding/modbus/master_slave_tcp_remote/build
$ ./bandwidth-client.exe
READ BITS
Transfert rate in points/seconds:
* 3802281 points/s
Values:
* 1000 x 2000 values
* 526.000 ms for 250000 bytes
* 463 KiB/s
Values and TCP Modbus overhead:
* 1000 x 271 bytes
* 526.000 ms for 271000 bytes
* 501 KiB/s
READ REGISTERS
Transfert rate in points/seconds:
* 230627 registers/s
Values:
* 1000 x 125 values
* 542.000 ms for 250000 bytes
* 450 KiB/s
Values and TCP Modbus overhead:
* 1000 x 271 bytes
* 542.000 ms for 271000 bytes
* 487 KiB/s
WRITE AND READ REGISTERS
Transfert rate in points/seconds:
* 227016 registers/s
Values:
* 1000 x 121 values
* 533.000 ms for 242000 bytes
* 442 KiB/s
Values and TCP Modbus overhead:
* 1000 x 263 bytes
* 533.000 ms for 263000 bytes
* 480 KiB/s
WRITE AND READ REGISTERS MESSAGE
IVT RULEZZ
Transfert rate in points/seconds:
* 211169 registers/s
Values:
* 1000 x 121 values
* 573.000 ms for 242000 bytes
* 411 KiB/s
Values and TCP Modbus overhead:
* 1000 x 263 bytes
* 573.000 ms for 263000 bytes
* 446 KiB/s
skevalt@pentium466 MINGW64 /d/Work/Coding/modbus/master_slave_tcp_remote/build
$
```

9. Налагодити та протестувати програми.

4 Вимоги до змісту та оформлення звіту

Звіт оформляється на аркушах формату А4 відповідно до вимог стандартів ЕСКД. Звіт про лабораторну роботу повинен містити:

- назва, мета та завдання роботи;
- скріншоти процедури створення пари віртуальних портів; коротка характеристика програми створення;
- скріншоти тестування обміну даними через пару віртуальних портів за допомогою програм `main_client` та `main_server`, ключові ділянки вихідного коду додатків, опис бібліотек, що використовуються.
- скріншоти обміну даними між клієнтом та сервером за протоколом `Modbus-RTU` та `Modbus-TCP`, коротка характеристика бібліотеки `libmodbus`.
- вихідний код програм, що здійснюють обмін даними за одним із варіантів використання COM-порту або інтерфейсу `RS-485`.
- висновки про виконану роботу загалом.

Контрольні питання

Що таке протокол `Modbus`, де та в яких лініях зв'язку він використовується?

Як здійснюється обмін даними під час використання `Modbus` протоколу?

Які режими передачі даних передбачені в досліджуваному протоколі, у чому їхня відмінність?

Які швидкості передачі використовуються під час роботи з протоколом передачі даних `Modbus`?

Фізична реалізація інтерфейсу `RS485`

Організація гальванічної розв'язки інтерфейсу `RS485`

Фізична реалізація інтерфейсу «струмової петлі»

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Промислові мережі: теорія і практика застосування протоколів та інтерфейсів : навч. посібник / І. Г. Лисаченко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – 174 с.

2. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навчальний посібник / О. М. Пупена, І. В. Ельперін, Н. М. Луцька, А. П. Ладанюк. – К. : Ліра, 2011. – 552 с..

**Формат 60x84/16. Умовн. друк. арк. 2,55. Зам. № 27. Наклад 50 прим.
Видавництво УжНУ «Говерла».
88000, м. Ужгород, вул. Капітульна, 18. E-mail: goverla-print@uzhnu.edu.ua**

**Свідоцтво про внесення до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції –
Серія 3т № 32 від 31 травня 2006 року**