

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

(повне найменування факультету)

Кафедра інформаційної безпеки та наноелектроніки

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: «Оптимізація інтерфейсу інформаційно-вимірювальних систем при
дистанційних вимірюваннях»

Виконав: студент II курсу, групи БК-412м
Спеціальності 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____
«Якість, стандартизація та сертифікація»

ГАРБУЗ С. В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник НАГОРНА Н. М.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ЗАГАЄВСЬКА В. І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

Кафедра інформаційної безпеки та наноелектроніки

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) «Якість, стандартизація та сертифікація»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри ІБтаН КОРОТУН А.В.
«_____» _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА
ГАРБУЗУ Семену Володимировичу

1. Тема проекту (роботи) Оптимізація інтерфейсу інформаційно-вимірювальних систем при дистанційних вимірюваннях
Optimization of the interface of information and measurement systems during remote measurements

керівник проекту (роботи) НАГОРНА Ніна Миколаївна
(науковий ступінь, вчене звання ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові,)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» листопада 2023 року №472

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 12 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Розробка моделі перетворювача напруги у струм інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА на базі мікросхеми XTR115. Вихідні дані для розробки перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу: діапазон входних струмів від -2,5 А до +2,5 А; діапазон вихідної напруги від 250 мВ до 2,75 В; позитивний входний струм перетворюється у вихідну напругу у діапазоні від 1,5 В до 2,75 В; негативний входний струм перетворюється у вихідну напругу у діапазоні від 250 мВ до 1,5 В; максимальне падіння напруги на резистивному шунті, що вмикається між входами вимірювального перетворювача, складає ± 25 мВ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Розділ 1. Теоретичні відомості. Поняття та класифікація інтерфейсів вимірювальних систем. Розділ 2. Оптимізація інтерфейсу «струмова петля». Розділ 3. Адаптація інтерфейсу «струмова петля» під інтелектуальні датчики.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація роботи (15 слайдів)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
1-3	НАГОРНА Н. М., старш.викл. каф. ІБтаН	16.10.23	12.012.23
Нормо-контроль	КОРОЛЬКОВ Р.Ю., доц. каф. ІБтаН	16.10.23	12.12.23

7. Дата видачі завдання « 16 » жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел та ознайомлення зі статтями за заданою тематикою.	16.10.23 – 31.10.23	Виконано
2	Ознайомлення з принципом роботи інтерфейсу «струмова петля»	01.11.23 – 11.11.23	Виконано
3	Розробка моделей пристроїв, що під'єднуються до інтерфейсу «струмова петля», та їх аналіз.	12.11.23 – 19.11.23	Виконано
4	Розгляд методів адаптації інтерфейсу «струмова петля» під інтелектуальні датчики.	20.11.23 – 28.11.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки і презентації.	29.11.23 – 11.11.23	Виконано

Студент

(підпис)

Семен ГАРБУЗ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Ніна НАГОРНА

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

ПЗ містить: 49 с., 26 рис., 2 табл., 18 джерел, 2 дод.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ, СТРУМОВА ПЕТЛЯ, ПРИЙМАЧІ СИГНАЛУ СТРУМУ, МІКРОСХЕМА ХТR115, МІКРОСХЕМА ІNА213, АДАПТАЦІЯ ІNТЕРФЕЙСУ.

Об'єкт дослідження: оптимізація параметрів інтерфейсу в інформаційно-вимірювальних системах (ІВС), зокрема для віддалених вимірювань. Представлена робота включає детальний аналіз аналогових інтерфейсів у інформаційно-вимірювальних системах, зосереджуючись на їх класифікації, характеристиках та методах підвищення їхньої ефективності. У роботі акцентується увага на важливість мінімізації помилок у інтерфейсі «струмова петля».

Метою представленої роботи є розробка підходів до оптимізації параметрів компонентів інтерфейсів інформаційно-вимірювальних систем на основі ретельного підрахунку похибок, що виникають при передачі даних, та на основі оптимально підібраної методики.

Методи дослідження – аналітичні, програмні, експертні, дизайнерські, імітаційні. Вказані методи дослідження дозволили відокремити основні напрямки дослідження інтерфейсів для подальшої можливості оптимізації параметрів їх компонентів, а також представлення результатів роботи у найбільш зручній для сприйняття формі.

У першому розділі надаються теоретичні відомості. У ньому розглядаються поняття та класифікація інтерфейсів вимірювальних систем та приладів. Детально розглядаються різні типи інтерфейсів, їх характеристики, способи з'єднання, а також стандарти, які застосовуються в цій області. Особлива увага приділяється аналізу різних типів зв'язків, їх призначенню та функціональним особливостям.

Другий розділ присвячений оптимізації інтерфейсу "струмова петля". У цьому розділі детально розглядається принцип роботи струмової петлі, її важливість у промисловій автоматичі, особливості передавання сигналів через цей інтерфейс. Важливу увагу приділено розробці моделі перетворювача напруги у струм для інтерфейсу «струмова петля» та обговоренню використання спеціалізованих мікросхем для цієї мети.

У третьому розділі розглядаються принципи роботи інтерфейсу «струмова петля» при під'єднанні до неї інтелектуальних датчиків на основі протоколу HART.

Дана робота може посприяти застосуванню аналогових інтерфейсів, що працюють оптимально в умовах промислових підприємств з сучасним технологічним обладнанням.

ЗМІСТ

	С.
Вступ	8
1 Теоретичні відомості.....	10
1.1 Поняття та класифікація інтерфейсів вимірювальних систем та приладів	10
1.1.1 Поняття інтерфейсів вимірювальних систем та приладів	10
1.1.2 Класифікація інтерфейсів вимірювальних систем	11
1.1.3 Характеристики інтерфейсів та стандартів	15
1.1.3.1 Сім'я інтерфейсів RS	15
1.1.3.2 Сім'я інтерфейсів IEEE та Ethernet	18
1.1.3.3 Сім'я інтерфейсів USB	20
2 Оптимізація інтерфейсу «струмова петля»	21
2.1 Принцип роботи інтерфейсу «струмова петля»	21
2.2 Розробка моделі перетворювача напруги у струм інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА на базі мікросхеми XTR115	24
2.3 Аналіз роботи моделі перетворювача напруги у струм інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА на базі мікросхеми XTR115	28
2.4 Розробка оптимальної схеми перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу з використанням спеціалізованих мікросхем	31
2.4.1 Вихідні дані для розробки перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу	31
2.4.2 Обґрунтування вибору мікросхеми INA213	32
2.4.3 Обґрунтування вибору мікросхеми REF2030.....	33
2.4.4 Моделювання роботи перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу.....	34
2.4.5 Обчислення похибок вимірювання пристрою.....	37
3 Адаптація інтерфейсу «струмова петля» під інтелектуальні датчики.....	39

Висновки	42
Перелік джерел посилань	43
Додаток А.....	45
Додаток Б.....	47

ВСТУП

Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) - це комплекси технічних засобів, програмного забезпечення, інформаційних і метрологічних процедур, що забезпечують збір, обробку, відображення, збереження і передачу інформації про стан об'єктів вимірювання. Їх основне призначення - отримання достовірних і актуальних даних про фізичні, хімічні, біологічні та інші величини, які можуть бути використані в різноманітних галузях, від промисловості до наукових досліджень.

У склад ІВС входять:

- датчики і перетворювачі, що сприймають зміни фізичних величин і перетворюють їх у електричний сигнал;
- прилади та обладнання для попередньої обробки сигналів (фільтрація, підсилення, лінеаризація);
- аналого-цифрові перетворювачі, які перетворюють аналогові сигнали у цифрову форму для подальшого комп'ютерного аналізу;
- блоки обчислення і обробки даних, у яких здійснює відбір, нормалізацію, статистичну обробку вимірюваної інформації;
- інтерфейси для взаємодії елементів ІВС між собою, а також для комунікації системи з користувачем чи іншими системами;
- програмне забезпечення для управління процесом вимірювання, обробки даних, візуалізації результатів та забезпечення взаємодії з користувачами.

ІВС можуть бути реалізовані як у формі компактних пристроїв, так і у вигляді складних розподілених систем. Вони є невід'ємною частиною сучасних промислових автоматизованих систем, систем управління якістю, екологічного моніторингу, медицини, та інших сфер, де потрібне точне і швидке вимірювання параметрів.

Оптимізація інтерфейсів ІВС є ключовим фактором для покращення ефективності, точності, відповідності метрологічним нормам і зручності

використання систем, особливо в умовах дистанційних вимірювань, де пряме спостереження чи управління процесом обмежені або неможливі.

Розвиток інформаційно-вимірювальних систем тісно пов'язаний із прогресом у мікроелектроніці, програмуванні та телекомунікаціях. Цей прогрес забезпечує більш компактні, потужні та енергоефективні компоненти, що дозволяє ІВС виконувати складні вимірювання та обробку даних швидше та ефективніше. Також це сприяє розширенню можливостей ІВС, включаючи підвищену інтеграцію з іншими системами, підтримку передових алгоритмів обробки даних та здатність до автоматизації складних процесів.

Інформаційно-вимірювальні системи значно сприяють автоматизації вимірювальних процесів, що підвищує точність та зменшує людські помилки. Ця автоматизація забезпечує послідовність та надійність результатів, важливі для критичних застосувань. Це також ефективно зменшує витрати часу та ресурсів на вимірювання, роблячи процеси більш економічно ефективними.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Поняття та класифікація інтерфейсів вимірювальних систем та приладів

1.1.1 Поняття інтерфейсів вимірювальних систем та приладів

Інтерфейс - сукупність уніфікованих апаратних, програмних, конструктивних засобів, які необхідні для реалізації алгоритмів взаємодії різних функціональних блоків вимірювальних систем та приладів [1].

Такі параметри, як тип та склад ліній зв'язку, сигнальні параметри (електричні, часові), інформаційні формати, алгоритми функціонування, конструктивне виконання з'єднань в інтерфейсах стандартизуються.

Приладовий інтерфейс - це сукупність сигналів, яка забезпечує обмін інформацією і управління деяким конкретним приладом. Функціональним призначенням приладового інтерфейсу є зв'язок пристроїв введення інформації або об'єктів керування з ЕОМ на основі довільно вибраного розробником рішення.

Інтерфейс периферійних пристроїв має таке саме призначення, але зв'язок з ЕОМ відбувається на базі стандартного рішення.

На рис. 1.1 показаний приклад з'єднання мікропроцесорної системи, яка конструктивно виконана у вигляді плати, з ЕОМ послідовним інтерфейсом RS-232C.

Сполучення за послідовним інтерфейсом дає можливість використання дешевої потенціальної розв'язки у зв'язку з тим, що кількість каналів невелика. З цих причин в основі всіх промислових мереж лежить послідовний інтерфейс.

Інтерфейс локальної обчислювальної мережі (ЛВС) – це інтерфейс, який призначений для включення мікропроцесорної системи в локальну обчислювальну мережу, яка є системою робочих станцій на базі персональних комп'ютерів і програмованих контролерів, пов'язаних між собою каналами передачі даних і територіально розташованих, як правило, в межах однієї будівлі.

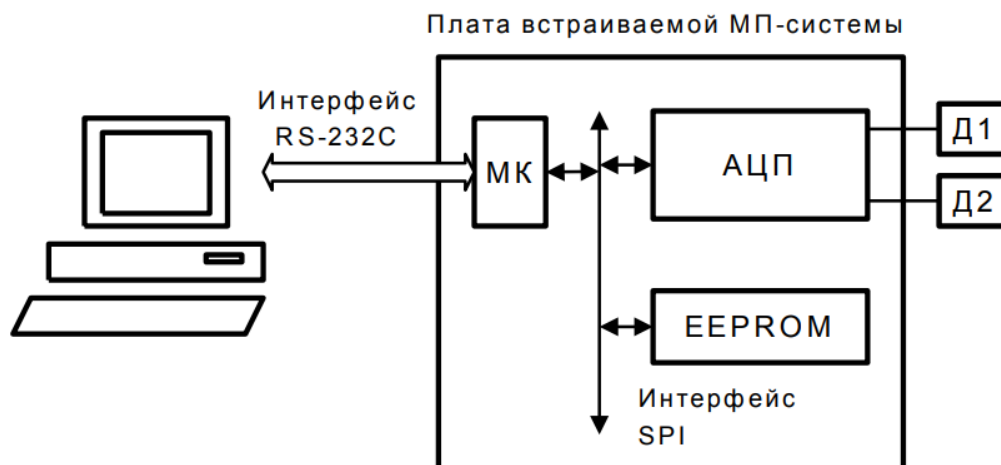


Рисунок 1.1 - З'єднання мікропроцесорної системи з ЕОМ послідовним інтерфейсом RS-232C

1.1.2 Класифікація інтерфейсів вимірювальних систем

Основою класифікації є такі класифікаційні ознаки: універсальність або відкритість, тип зв'язків, призначення, фізична природа сигналу зв'язку, тип організації зв'язку, режим обміну інформацією, тип інтерфейсу та використовувані стандарти.

На рис. 1.2 наведено класифікацію інтерфейсів вимірювальних систем (ВС) та приладів.

Інтерфейси є програмно-технічними системами. Тому вони поділяються на відкриті та закриті.

Інтерфейси закритого типу відмежовані від обміну енергією та інформацією з довкіллям. Взаємодії підлягають тільки структурні компоненти усередині системи.

Інтерфейси відкритого типу функціонують при обміні енергією та інформацією з довкіллям.

Не існує абсолютно відкритих та закритих інтерфейсів. Властивість відкритості потрібно розглядати на різних рівнях ієрархії програмного та апаратного забезпечення системи та складових системи.

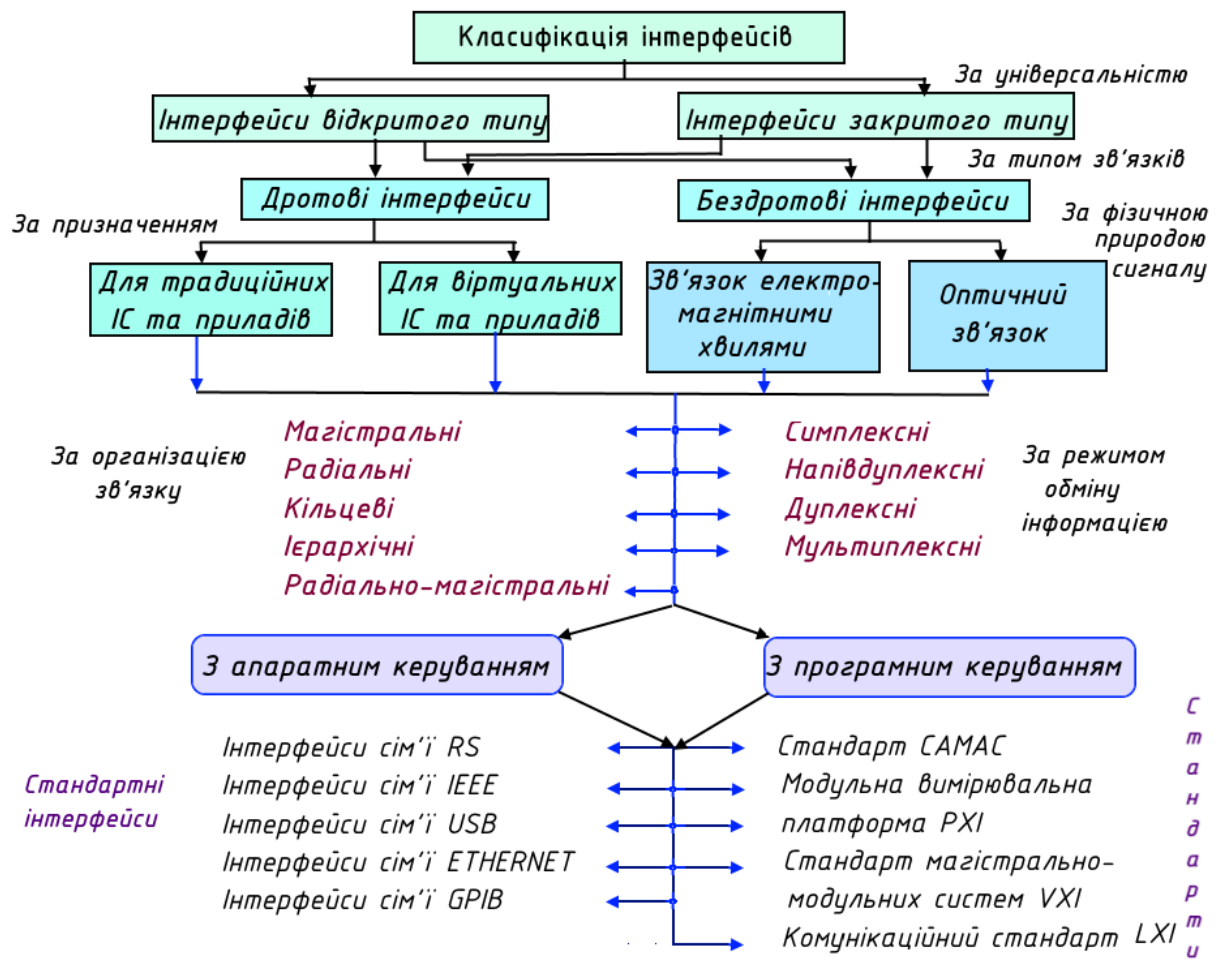


Рисунок 1.2 - Класифікація інтерфейсів вимірювальних систем та приладів

Відкритими, наприклад, можуть бути [2]:

- фізичні інтерфейси, протоколи обміну, методи контролю помилок, системи адресації, формати даних, типи організації мережі, інтерфейси між програмами, діапазони змін аналогових сигналів;

- інтерфейси користувача, мови програмування контролерів, керуючі команди модулів вводу-виводу, мови управління базами даних, операційні системи, засоби зв'язку апаратури з програмним забезпеченням;

- конструкційні елементи (шафи, стійки, корпуси, розніми, елементи кріплення).

Умови відкритості:

- модульність;
- відповідність стандартам;

- наявність у вільному продажу аналогічних систем (підсистем, модулів) інших виробників за цінами, що є конкурентоспроможними.

Ступінь відкритості оцінюється за кількістю реалізованих ознак відкритості. Відкриті системи мають такі позитивні властивості, завдяки яким системні інтегратори виявляють до них інтерес:

- модульність;
- незалежність платформи;
- взаємозамінність з компонентами (інтероперабельність) інших виробників;
- можливість спільної роботи з компонентами інших виробників;
- масштабованість.

У джерелі [2] стверджується, що закриті системи можуть бути також модульними, інтероперабельними, масштабованими. Тільки у відкритих системах вказані властивості повинні виконуватися для компонентів, виготовлених різними виробниками та наявних у вільному продажу.

Загальні властивості систем:

- розширюваність (масштабованість) - extensibility/scalability;
- мобільність (переносність) - portability;
- інтероперабельність (здатність до взаємодії з іншими системами) – interoperability;
- дружність до користувача, як то, легкість керованості - driveability.

За типом зв'язків інтерфейси бувають дротові та бездротові. Лінії зв'язку призначені для створення з'єднання вимірювальних систем, приладів та ЕОМ.

Лінія зв'язку має передавач, приймач сигналів та середовище передачі. Така структура аналогічна структурі каналу зв'язку. Але в одній лінії зв'язку може бути утворено від одного до декількох тисяч каналів в залежності від типу передавального та приймального пристроїв та середовища.

Канали можуть бути утвореними шляхом частотного, часового, кодового ущільнення лінії зв'язку. Різновиди та класифікація ліній зв'язку представлені на рис. 1.3 [3].

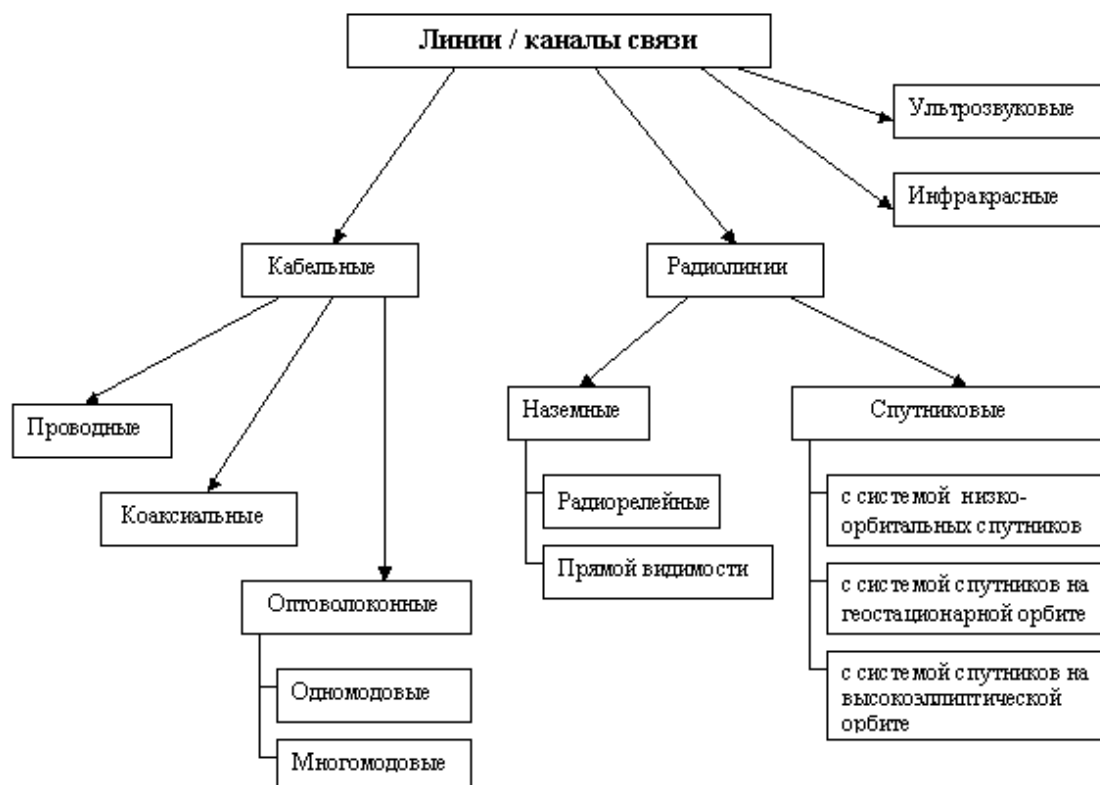


Рисунок 1.3 – Класифікація ліній зв'язку

Сучасними інструментальними платформами є платформа модульних та платформа традиційних вимірювальних приладів та інтегрованих схем (ІС). Тому за призначенням розрізняють інтерфейси для традиційних та віртуальних ІС та приладів.

За фізичною природою зв'язку виділяються інтерфейси з електромагнітними та оптичними зв'язками. Вказані інтерфейси також розрізняються за частотами.

З організації зв'язку інтерфейси поділяються на магістральні, радіальні (мережа зірка), кільцеві, ієрархічні, радіально-магістральні.

Магістральний інтерфейс в системах, у яких центральний модуль не має достатньої кількості каналів зв'язку для підключення усіх інших модулів. При використанні магістрального інтерфейсу знижується швидкодія системи, але при цьому спрощується апаратна реалізація інтерфейсу. Спільна магістраль зв'язує усі

модулі системи. Використовуються також комбінації інтерфейсів: каскадно-радіальний, каскадно-магістральний [4].

За режимом обміну інформацією інтерфейси поділяють на симплексні, напівдуплексні, дуплексні, мультидуплексні.

В інтерфейсах із симплексним режимом обміну інформацією можлива лише односпрямована передача інформації від одного абонента до іншого. У таких інтерфейсах буферні каскади передавача та приймача інформації виконуються односпрямованими.

В інтерфейсах з напівдуплексним режимом обміну в довільний момент часу здійснюється або тільки приймання, або тільки передавання даних між двома модулями. Буфери приймача кожного з модулів виконуються двонаправленими.

В інтерфейсах з дуплексним режимом обміну в довільний момент часу може здійснюватися одночасно і приймання і передавання даних між модулями.

За типом керування розрізняються інтерфейси з апаратним та програмним керуваннями.

Із існуючих типів інтерфейсів найбільш поширеними є інтерфейси сімейств: RS, IEEE, USB, ETHERNET, GPIB, які побудовані за стандартами CAMAC, PXI, VXI и LXI.

1.1.3 Характеристики інтерфейсів та стандартів

1.1.3.1 Сім'я інтерфейсів RS

Ці інтерфейси розрізняються в основному швидкостями передачі даних та способами подання сигналів фізично. Що ж до логіки їх формування, то все сказане далі однаково відноситься до всіх інтерфейсів сімейства RS.

На рис. 1.4 представлена "канонічна" схема підключення комп'ютера до модему через асинхронний інтерфейс RS-232. У даному випадку взаємодіючі

пристрої називаються аббревіатурами DTE (Data Terminal Equipment) і DCE (Data Communication Equipment) [5].

Інтерфейс RS-232 - один з найбільш популярних інтерфейсів сім'ї RS, до якої також входять інтерфейси V.35, RS-422, RS-449, RS-530, ANSI/TIA/EIA-232-F-1999, ANSI/TIA/EIA-574-90(R98), ANSI/TIA/EIA-723-98, ANSI/TIA/EIA-404-B-96 тощо.

RS-232 – провідний дуплексний інтерфейс. Метод передавання аналогічний асинхронному послідовному інтерфейсу. Передавання даних у той чи інший бік можливе лише за умови, що приймач готовий прийняти ці дані. Якщо встановлено, що приймач не готовий, то джерело даних припиняє роботу, чекає появу готовності, відновлює передавання і так далі. Це так зване апаратне управління потоком даних (hardware flow control).

На рис. 1.4 наведена типова схема підключення асинхронного інтерфейсу до ЕОМ [6]. Близькі за функціональним призначенням групи сигналів виділені овалами. Як видно з рис. 1.4, пристрої DTE та DCE відрізняються напрямками передавання сигналів. Так, сигнал TxD даних, що передаються, є вихідним для пристрою DTE та входним для пристрою DCE тощо.

В основу роботи сім'ї інтерфейсів RS покладений принцип дуплексного цифрового зв'язку, принцип програмного керування та принцип фізичного (провідного) зв'язку.

Принцип дуплексного цифрового зв'язку: велика пропускна здатність каналу зв'язку досягається, якщо передачу даних в обох напрямках здійснювати одним каналом зв'язку з часовим поділом потоків даних.

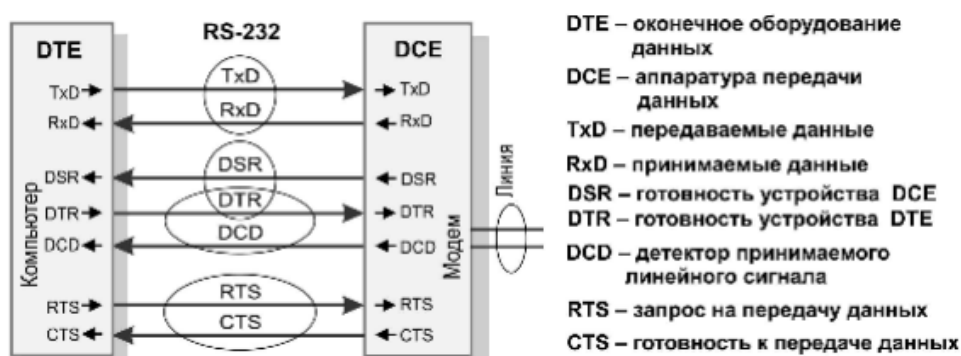


Рисунок 1.4 - Канонічна схема підключення асинхронного інтерфейсу до ЕОМ

Принцип дуплексного аналогового зв'язку: велика пропускна здатність каналу аналогового зв'язку досягається, якщо одночасна безперервна передача даних здійснюється в обох напрямках по одному каналу зв'язку з нормованою різницею частот приймання і передавання.

Принцип асинхронності передачі даних: економний обмін даними досягається, якщо їх передавання здійснюється іноді і лише однією посилкою.

Принцип асинхронності виконання операцій: економія витрат на виконання операцій може бути здійснена тільки тоді, коли код, що викликає, не блокується на час обчислення, а продовжує працювати далі до завершення операції, після чого здійснюється зворотний виклик або інше повідомлення сповістить цей код про те, що результат готовий.

Завдяки асинхронному способу обміну інформацією вартість систем для асинхронного зв'язку вдесятеро менша, ніж для синхронного. Недоліком асинхронному способу є невисока швидкість передачі.

Принцип програмного керування полягає в тому, що після повідомлення машині адреси першої команди програми та занесення тіла цієї команди до регістру команд, програма управляє сама собою. Далі ніякого зовнішнього керування не потрібно. Цей принцип виконується як на рівні команд, так і на рівні мікрокоманд [7].

Програма, що виконується ЕОМ, є послідовністю команд (рис. 1.5). Для того щоб забезпечити послідовне виконання команд, виконується наступне: до адреси першої команди додається її довжина (в байтах), в такий спосіб визначається адреса другої команди; після виконання другої команди до її адреси додається її довжина та визначається адреса третьої команди тощо. Якщо послідовне виконання команд порушується, то виконується процес умовного переходу.

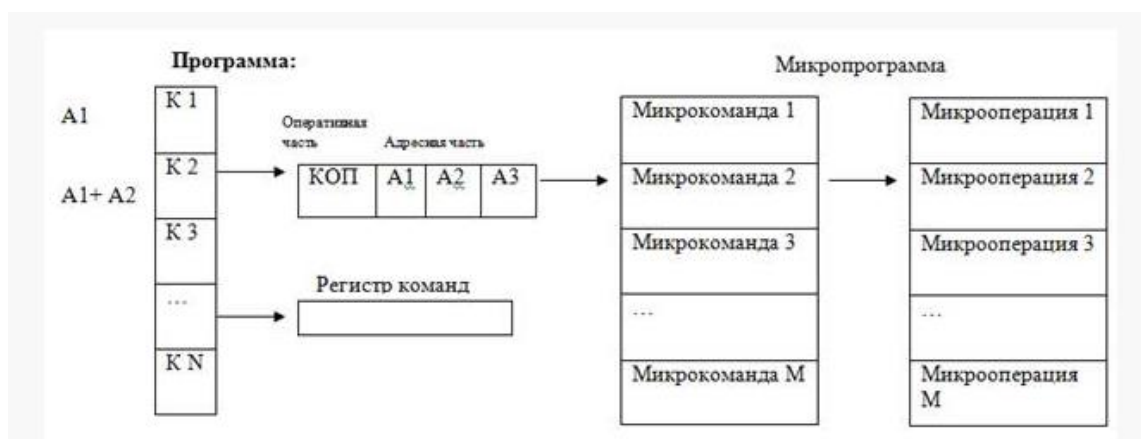


Рисунок 1.5 – Послідовність виконання програм і мікрооперацій

Код операції – код, що знаходиться у оперативній частині команди. Він визначає, яка саме операція виконується. Код займає 8 біт.

Мікрооперація – елементарна дія всередині обчислювальної машини.

Адреса – частина команди, де зберігаються адреси.

Команди бувають одно-, дво-, триадресні та безадресні (використовуються для зменшення кількості звернень до оперативної пам'яті).

Регістр команд – регістр, після розміщення в який, тіло команди почне виконуватися.

Команди дробляться на мікрокоманди. Мікрокоманди та мікрооперації перебувають у постійній пам'яті. Кожній мікрокоманді може відповідати одна чи кілька мікрооперацій.

Принцип фізичного зв'язку - прийом та/або передача повідомлень (даних) здійснюється тільки за допомогою фізично виділеної лінії - провідної або оптоволоконної.

1.1.3.2 Сім'я інтерфейсів IEEE та Ethernet

На сьогоднішній день Ethernet та IEEE 802.3 є найпоширенішими протоколами локальних обчислювальних мереж (ЛОМ). Сьогодні термін Ethernet найчастіше

використовується для опису всіх ЛОМ, що працюють за принципом множинного доступу з виявленням несучої (CSMA/CD), які відповідають Ethernet, включаючи IEEE 802.3 [8, 9].

Ethernet і IEEE 802.3 є різними стандартами, але оскільки вони дуже схожі один на одного, то використовуються як взаємозамінні. Ethernet та IEEE 802.3 створені за подібними технологіями.

Якщо для IEEE 802.3 існує кілька різних стандартів фізичного рівня, то для Ethernet є лише один. Кожен із стандартів протоколу фізичного рівня IEEE 802.3 має своє найменування, що визначає його найважливіші характеристики.

Різні модифікації стандартного інтерфейсу IEEE 802.3 передбачають використання товстого та тонкого коаксіального кабелю з хвильовим опором 50 Ом, неекранованої кручений пари, або 75-омного коаксіального кабелю.

Переваги використання крученої пари в порівнянні з коаксіальним кабелем наступні:

- можливість роботи у дуплексному режимі;
- низька вартість кабелю «витої пари»;
- вища надійність мереж при несправності в кабелі;
- мінімально допустимий радіус вигину менше, ніж у коаксіального кабелю;
- велика стійкість до завад через використання диференціального сигналу;
- можливість живлення кабелем малопотужних вузлів, наприклад IP-телефонів (стандарт Power over Ethernet (POE));
- гальванічна розв'язка трансформаторного типу.

Стандарт для оптоволокна специфікований в IEEE 802.3-2005, а для крученої пари в IEEE 802.3ap-2006.

В основу роботи сім'ї інтерфейсів Ethernet та IEEE 802.3 покладено принцип фізичного зв'язку, принцип дуплексного зв'язку, принцип програмного управління.

1.1.3.3 Сім'я інтерфейсів USB

Сімейство інтерфейсів USB (Universal Serial Bus) - "універсальна послідовна шина") - послідовний інтерфейс передачі даних для середньошвидкісних та низькошвидкісних периферійних пристроїв у вимірювальній та обчислювальній техніці [11].

Для підключення периферійних пристроїв до шини USB використовується кабель з чотирма дротами. Два дроти (вита пара) у диференціальному включенні використовуються для приймання та передавання даних, а два інших дроти - для живлення периферійного пристрою.

Завдяки вбудованим лініям живлення інтерфейс USB дозволяє підключати периферійні пристрої без власного джерела живлення (максимальна сила струму, що споживається пристроєм по лініях живлення шини USB, не повинна перевищувати 500 мА, USB 3.0 - 900 мА).

У 2008 році з'явилася версія USB 3.0 оновленого стандарту. У специфікації USB 3.0 розніми та кабелі оновленого стандарту фізично та функціонально сумісні з USB 2.0. Якщо кабель USB 2.0 містить чотири лінії - пару для приймання/передавання даних, плюс та нуль живлення і забезпечує максимальну швидкість передавання інформації 480 Мбіт/с, то до кабелю USB 3.0 додано ще чотири лінії зв'язку (дві кручені пари).

Максимальна швидкість передавання збільшена до 5 Гбіт/с. Третя версія відрізняється від другої не тільки вищою швидкістю передачі інформації, але і збільшеною силою струму з 500 до 900 мА. Тому від даного порту можна запитувати і заряджати пристрої, які споживають струм більше 1 А, причому заряджання буде йти при вимкненому комп'ютері.

На деяких материнських платах і ноутбуках одне або кілька гнізд USB 3.0 можуть бути позначені блискавкою. USB 3.0 сумісний зі старими стандартами. В основу роботи універсальної послідовної USB шини покладено принципи провідного зв'язку, дуплексності, синхронності.

2 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕРФЕЙСУ «СТРУМОВА ПЕТЛЯ»

2.1 Принцип роботи інтерфейсу «струмова петля»

Один із інтерфейсів промислової автоматики – струмова петля, яка використовується для передачі даних від вимірювальних перетворювачів контролерам.

Струмова петля (current loop) - це спосіб передавання сигналів при зміні сили струму в електричному ланцюзі за допомогою керованого джерела струму.

Також існує інший спосіб передавання сигналів за допомогою змінення напруги, який дозволяє використовувати слаботочні сигнали достатньої потужності, оскільки потужність сигналу $P = U \cdot I$ значною мірою залежить від значення напруги.

Але напруга, як носій сигналу, чутлива до електромагнітних полів. Крім того, при передаванні сигналів виникає падіння напруги на лінії зв'язку за рахунок наявності активних опорів у провідників. Значення активних опорів залежить від багатьох факторів, зокрема, температури. Тому такі інтерфейси потребують регулярного налаштування (рис. 2.1).

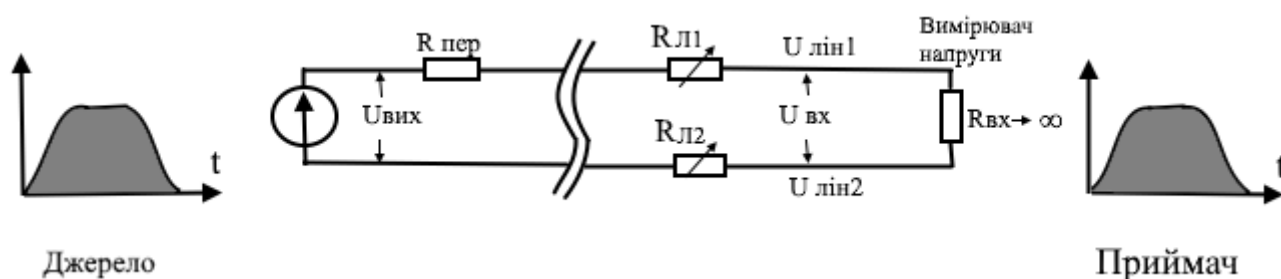


Рисунок 2.1 – Петля напруги. Напруга на вході приймача

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вих передавача}} + U_{\text{дротів}}$$

Завада напругою $U_{\text{зав}}$, що виникає в лінії зв'язку, підсумовується з сигналом, що передається. Внаслідок цього фільтрація сигналу від завад ускладнена (рис. 2.2).

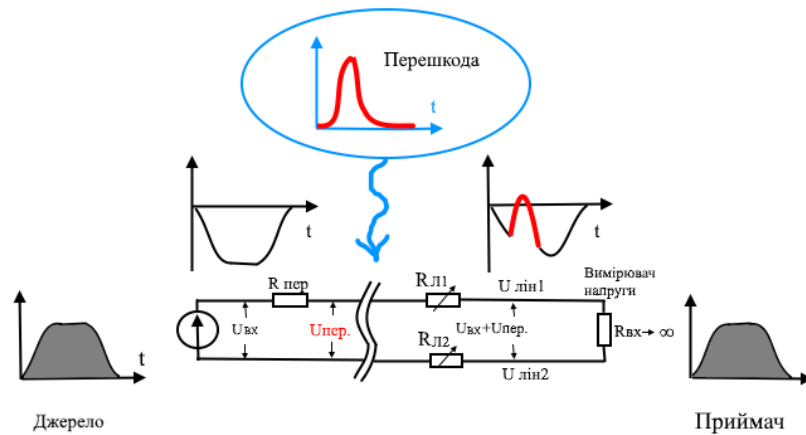


Рисунок 2.2 – Ілюстрація впливу завад на вихідний сигнал

А Струмова петля нечутлива до активного опору лінії зв'язку. На струм, який протікає по струмовій петлі, не впливають ні активний опір кабелю, ні опір навантаження, ні ЕРС індуктивної завади, оскільки струм струмової петлі однаковий у замкненому ланцюгу.

Тому принцип передачі сигналів на основі струмової петлі використовується передачі сигналів на великі відстані, що важливо при виконанні дистанційних вимірювань. На рис. 2.3 показаний принцип дії струмової петлі.

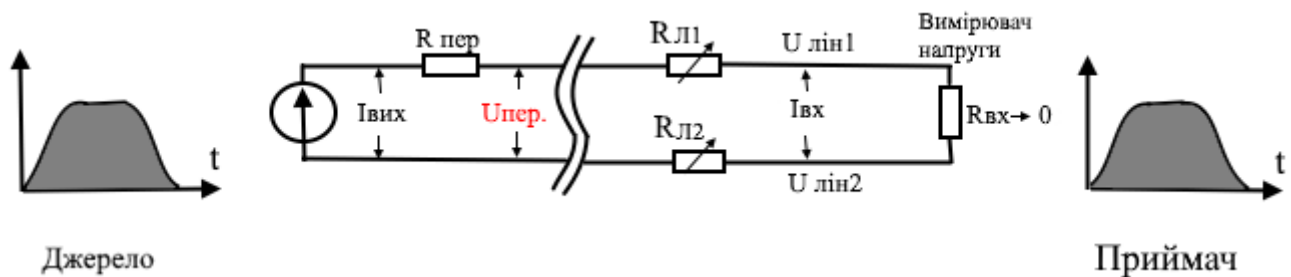


Рисунок 2.3 – Струмова петля, в якій $I_{вх} = I_{вих}$

У струмовій петлі величина струму петлі залежить від напруги живлення самого джерела струму. Відомо, що струмові витoki в кабелі дуже малі. Тому, у якості лінії передачі використовується екранована кручена пара (рис. 2.4), до якої

підключається приймач сигналу, вхідним каскадом якого є диференційний підсилювач. Таке вмикання дозволяє ослаблювати завади.

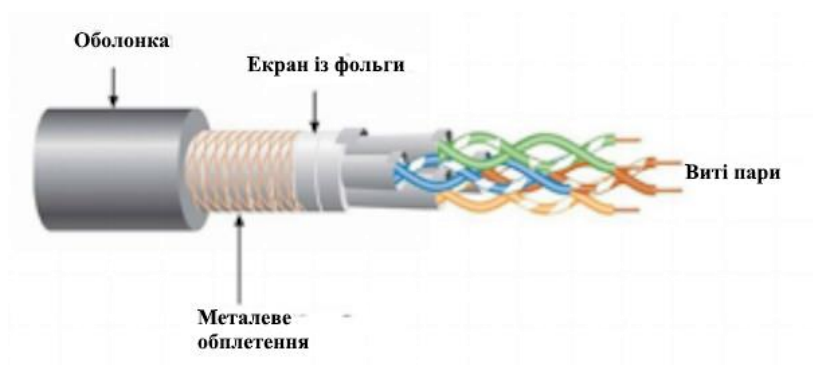


Рисунок 2.4- Вити пара

У приймачі сигналу струм струмової петлі може бути перетворений у напругу за допомогою відкаліброваного резистора. Якщо використовувати резистори опором 125, 250, 500 Ом, то при струмі у струмовій петлі 20 мА формується напруга 2,5; 5,0; 10 В. Ці величини напруги входять у стандартний ряд.

При дистанційних вимірюваннях за допомогою струмової петлі можна отримати високоточну передачу сигналу з похибкою приблизно $\pm 0,05\%$. Тому інтерфейс «струмова петля» дуже часто використовується у вимірювальних системах, що працюють у промисловості.

Якщо у вказаному інтерфейсі використовується діапазон струмів 4 мА...20 мА, то нульовим значенням фізичної величини, що вимірюється відповідає 4 мА. Тоді вторинне обладнання такі аварійні ситуації, як відмова датчика та обрив лінії буде відрізняти від нульових показів датчика.

Значення струму 0 мА означає обрив, 4 мА - мінімальний рівень сигналу, 20 мА - максимальний рівень сигналу.

Випускається дуже багато промислових датчиків з підключенням до інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА.

Недоліком струмової петлі є низька швидкодія, обмежена швидкістю перезарядки паразитної ємності кабелю.

2.2 Розробка моделі перетворювача напруги у струм інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА на базі мікросхеми XTR115

Для отримання якісного інтерфейсу типу «струмова петля» доцільно використовувати спеціалізовані мікросхеми, які за параметрами оптимізовані для використання у вказаному інтерфейсі. Такими мікросхемами є мікросхеми типів XTR115 та XTR116.

Мікросхеми XTR115 і XTR116 є прецизійними струмовими перетворювачами, на виходах яких формуються стандартні струми величиною 4...20 мА. Струми такої величини призначені для пропускання їх через стандартну промислову струмову петлю.

Мікросхеми мають вбудований п'ятивольтовий стабілізатор напруги з зовнішнім живленням. Джерело живлення стабілізатора підключається до входу 8 (рис. 2.5). А на виході $V+$ (вивід 7) формується стабілізована напруга величиною 5 В. До виводу 7 приєднується колектор зовнішнього біполярного транзистора, який служить для підсилення струму.

Прецизійне вбудоване джерело опорної напруги на виході 1 формує напругу V_{REF} (2,5 В для XTR115 і 4,096 В для XTR116). Ця напруга доступна для зовнішніх схем і не використовується всередині мікросхем. Сформовану напругу V_{REF} можна використати для зміщення вхідного струму I_{IN} (вхід 1) для отримання мінімального рівня струму 4 мА.

Через зовнішній транзистор біполярний п-р-п транзистор, проходить більша частини струму петлі, що тече через навантажувальний резистор R_L .

Потужність розсіювання на цьому транзисторі може бути достатньо високою при струмі близько 20 мА. Тому тепло, вироблене зовнішнім транзистором, може вплинути на роботу мікросхеми. Тому при проєктуванні плати треба розміщувати зовнішній транзистор подалі від мікросхем. Мікросхеми XTR115/116 розроблені так, що можна використовувати будь-який транзистор п-р-п з достатньою напругою, струмом і потужністю.

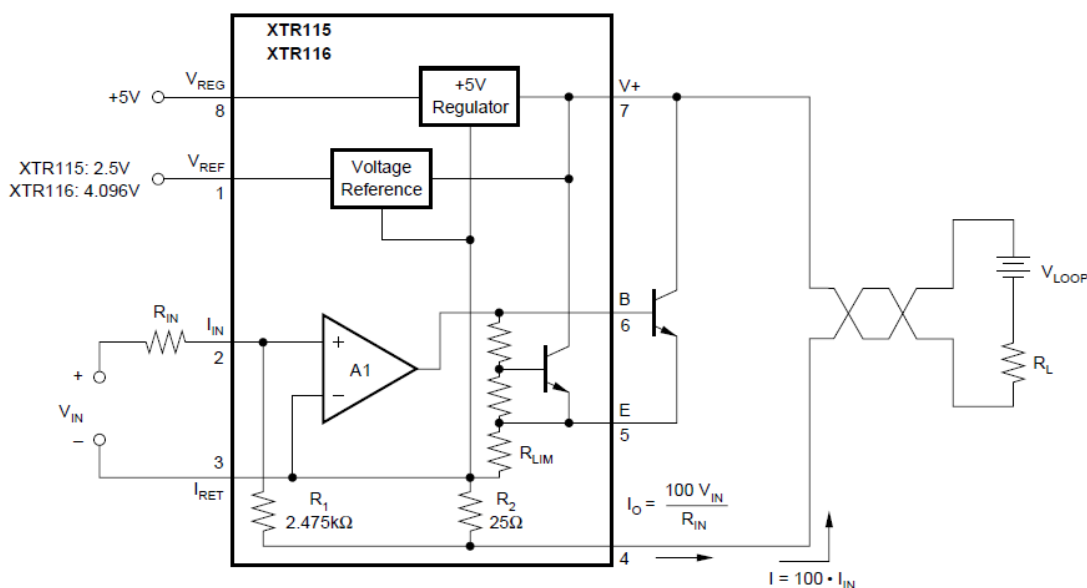


Рисунок 2.5 – Структурна схема мікросхем XTR115 і XTR116 з зовнішніми підключеннями

При нульовому входному струмі необхідно мати струм у петлі величиною 4 мА. Для цього на вході треба створити струм величиною 40 мкА шляхом створення напруги зміщення на вході за допомогою резистора R_0 відповідного значення. Варіант підключення вказаного резистора показаний на рис. 2.6.

На основі проробки технічних умов на мікросхему XTR115 була розроблена модель мікросхеми з використанням програми TINA, одним з основних компонентів якої є операційний підсилювач OPA347. Операційний підсилювач представлений стандартною моделлю. Прецизійне вбудоване джерело опорної напруги V_{REF} моделюється джерелом постійної напруги 2,5 В. В моделі йому призначений ідентифікатор V_{REF} .

П'ятивольтовий стабілізатор напруги теж представлений в моделі джерелом постійної напруги. Його ідентифікатор V_{REG} . В мікросхемі є внутрішній буферний біполярний транзистор. В моделі він не відображений внаслідок його малої потужності. Практично весь струм струмової петлі забезпечується зовнішнім біполярним транзистором.

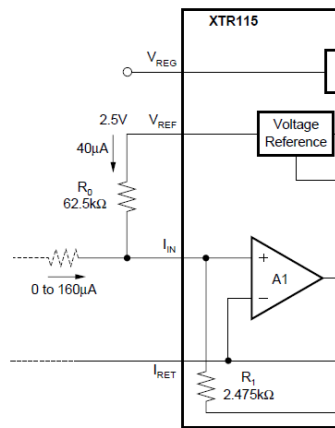


Рисунок 2.6 – Спосіб підключення резистора R0 для зміщення напруги на вході

На рис. 2.7 показана розроблена модель, яка дозволяє моделювати роботу струмової петлі. Вона дозволяє перетворювати вхідний струм у напругу у приймачі на основі стандартів струмової петлі 4 мА...20 мА.

Для того, щоб отримати струм I_{LOOP} струмової петлі, що змінюється у діапазоні у діапазоні від 4 мА до 20 мА, джерело вхідної напруги повинно змінювати напругу у діапазоні від $V_{in \min} = 0,1$ В до $V_{in \max} = 1$ В. Для забезпечення величини вхідного струму I_{in} , рівного 160 мА підбиралося значення опору резистора R_{in} , послідовно з'єднаного з вхідним джерелом напруги:

$$R_{in} = \frac{V_{in \max} - V_{in \min}}{0,16 \cdot 10^{-3}} = 5625 \text{ Ом} = 5,625 \text{ кОм}.$$

Для того щоб при мінімальному значенні джерела вхідної напруги у струмовій петлі формувався струм величиною 4 мА, необхідно передбачити на вході наявність струму зсуву $I_{\text{offset}} = 40$ мкА (в моделі він позначений, як I_{IN}).

Струм, що тече від вхідного джерела (в моделі він позначений, як I_{in})

$$I_{in \text{ offset}} = \frac{V_{in \min}}{R_{in}} = \frac{0,1}{5625} = 1,777778 \cdot 10^{-5} \text{ А} = 17,77778 \text{ мкА}.$$

Струм, що тече від джерела RFET

$$I_{os} = I_{offset} - I_{in offset} = 40 \cdot 10^{-6} - 17,77778 \cdot 10^{-6} = \\ = 22,22222 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 22,22222 \text{ мкА.}$$

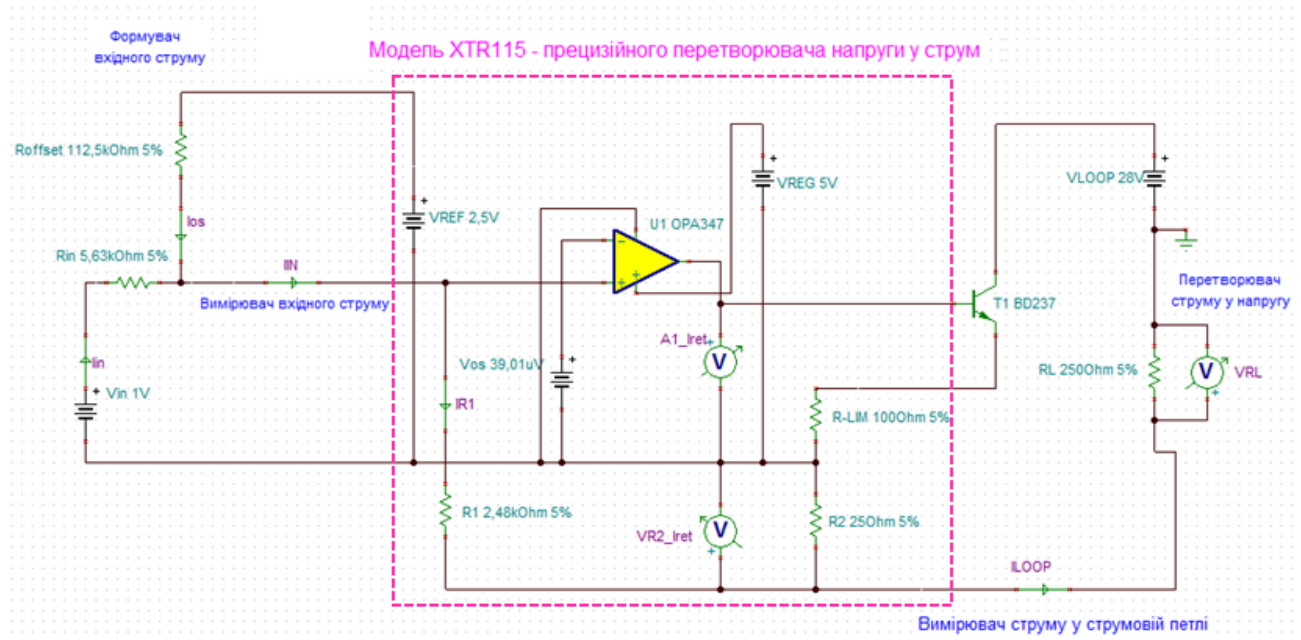


Рисунок 2.7 – Модель струмової петлі на основі блоків: передавача, перетворювача напруги у струм, приймача

Опір в ланцюзі зсуву

$$R_{offset} = \frac{V_{REF}}{I_{os}} = \frac{2,5}{22,22222 \cdot 10^{-6}} = 0,1125 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 112,5 \text{ кОм.}$$

Прийнято, що струм у струмовій петлі I_{LOOP} збільшується у 100 разів порівняно з вхідним струмом I_{IN} (в моделі він позначений, як I_{IN}) перетворювача напруги у струм струмової петлі, тобто коефіцієнт підсилення струму дорівнює 100.

Тоді можна записати

$$I_{LOOP} = 100 \cdot I_{IN} = 100 \cdot (I_{in} + I_{os}) = 100 \cdot \left(\frac{V_{in}}{R_{in}} + \frac{V_{REF}}{R_{offset}} \right);$$

$$I_{LOOP} = 100 \cdot \left(\frac{V_{in}}{5625} + \frac{2,5}{112500} \right) = 100 \cdot \left(\frac{V_{in}}{5625} + \frac{2,5}{112500} \right) [\text{A}].$$

Для підтвердження правильності вибору опорного резистора необхідно розрахувати струми у струмовій петлі при мінімальному і максимальному значеннях вхідної напруги.

При $V_{in \min} = 0,1 \text{ В}$:

$$I_{LOOP \min} = 100 \cdot \left(\frac{0,1}{5625} + \frac{2,5}{112500} \right) = 100 \cdot (1,777778 + 2,222222) \cdot 10^{-5} [\text{A}];$$

$$I_{LOOP \min} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 4 \text{ мА}.$$

При $V_{in \max} = 1 \text{ В}$:

$$I_{LOOP \max} = 100 \cdot \left(\frac{1}{5625} + \frac{2,5}{112500} \right) = 100 \cdot (17,777778 + 2,222222) \cdot 10^{-5} [\text{A}];$$

$$I_{LOOP \max} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 20 \text{ мА}.$$

Отримані значення струмів струмової петлі відповідають стандартним значенням.

2.3 Аналіз роботи моделі перетворювача напруги у струм інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА на базі мікросхеми XTR115

Аналіз перехідних процесів у моделі при вхідній напрузі $V_{IN} = 1 \text{ В}$ показує значення вхідного струму $I_{IN} = 0,2 \text{ мА}$, а значення струму струмової петлі $I_{LOOP} = 20 \text{ мА}$. На рис. 2.8 візир В показує значення вхідного струму, а візир А – значення I_{LOOP} .

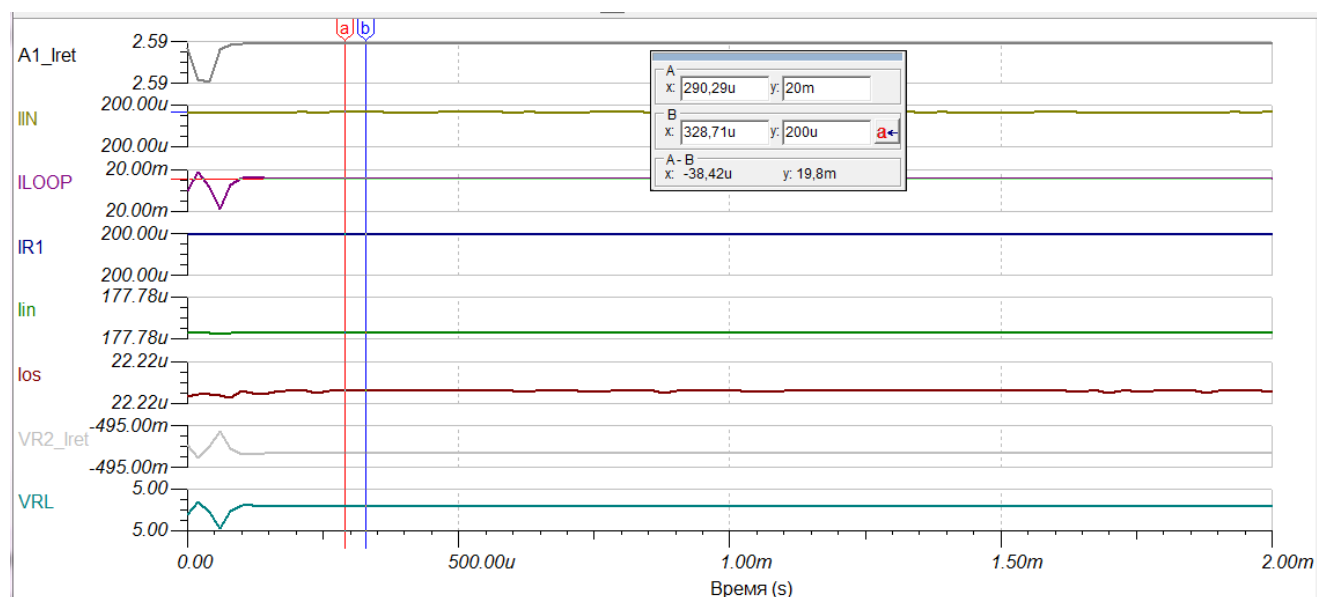


Рисунок 2.8 – Результати аналізу перехідних процесів при входній напрузі 1 В

Аналіз перехідних процесів у моделі при входній напрузі $V_{IN} = 0,1$ В показує значення входного струму $I_{IN} = 0,04$ мА, а значення струму струмової петлі $I_{LOOP} = 4$ мА. На рис. 2.9 візир А показує значення входного струму, а візир В – значення I_{LOOP} .

На рисунку 2.10 показані залежності струмів і напруги $VR2_Iret$ від входної напруги. Візир А показує значення струму I_{LOOP} при входній напрузі 0,1 В, а візир В – його значення при 1 В. Усі характеристики носять лінійний характер.

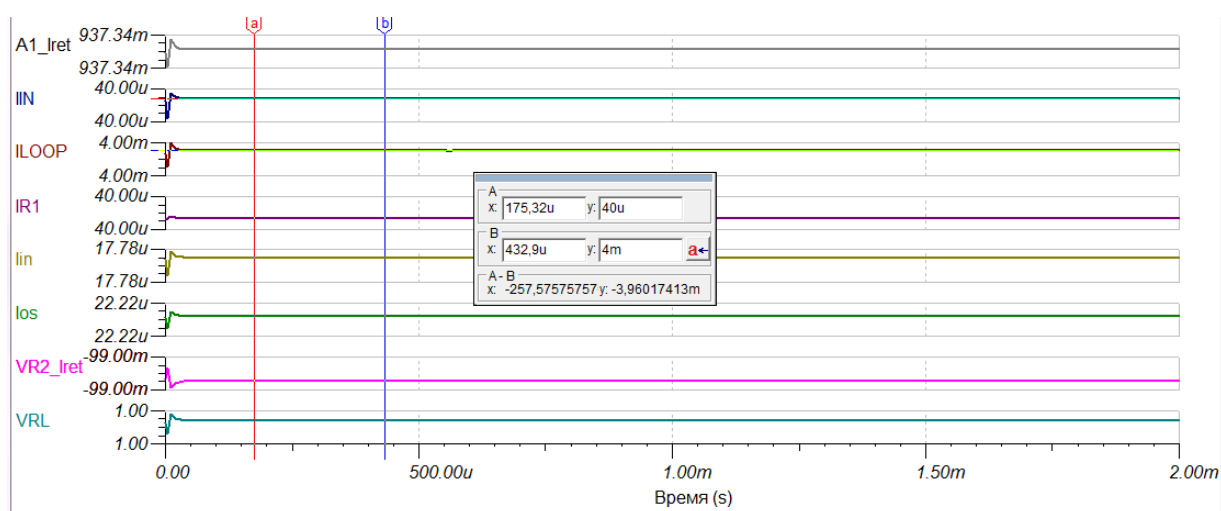


Рисунок 2.9 – Результати аналізу перехідних процесів при входній напрузі 0,1 В

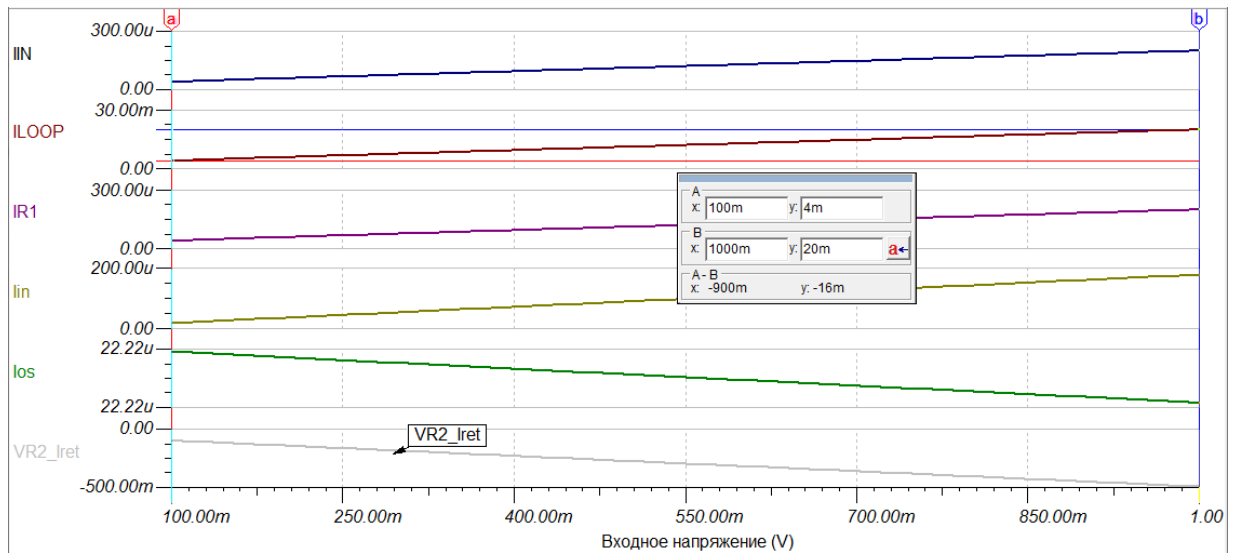


Рисунок 2.10 – Залежності струмів і напруги VR2_lret від вхідної напруги

Далі був виконаний аналіз перехідних процесів у моделі при зміні напруги вхідного джерела. Форма вхідного сигналу задавалася у редакторі сигналу (рис. 2.11). На рисунку 2.12 представлені результати аналізу. Як видно з графіків, зріз вхідної напруги триває 50 мкс, за такий же час змінюється вхідний струм, а струм у петлі I_{LOOP} при цьому змінюється на протязі 445 мкс, тобто спостерігається значна інерційність процесів у струмовій петлі. Візир А показує струм у петлі I_{LOOP} , у момент, коли вхідна напруга дорівнює дещо менше 1 В. Візир В показує струм у петлі I_{LOOP} у момент часу 1,03 мс.

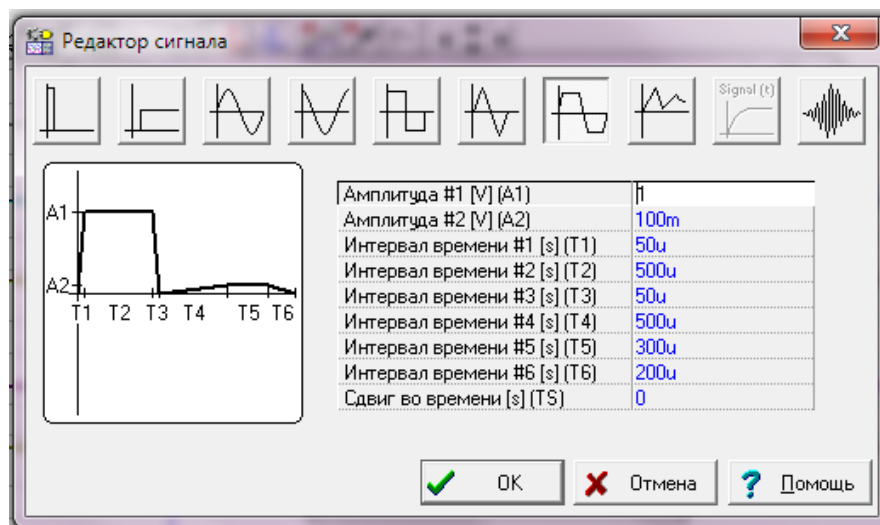


Рисунок 2.11 – Форма вхідного сигналу та його параметри

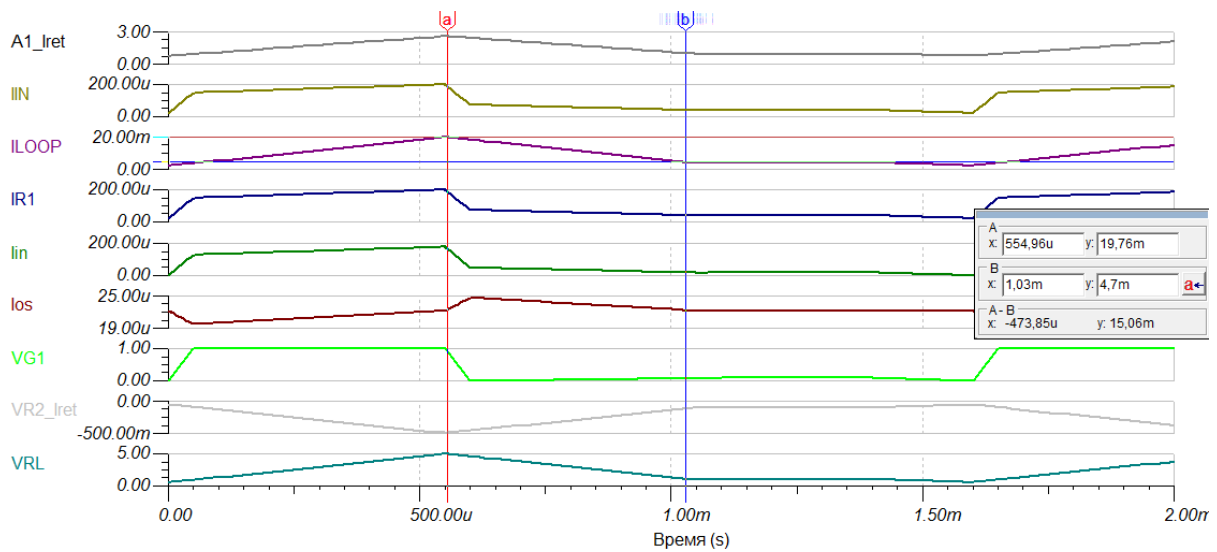


Рисунок 2.12 – Результати аналізу перехідних процесів при зміні вхідного сигналу VG1

2.4 Розробка оптимальної схеми перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу з використанням спеціалізованих мікросхем

2.4.1 Вихідні дані для розробки перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу

Перед розробкою задавалися наступні вихідні дані:

- діапазон вхідних струмів від -2,5 А до +2,5 А;
- діапазон вихідної напруги від 250 мВ до 2,75 В;
- позитивний вхідний струм перетворюється у вихідну напругу у діапазоні від 1,5 В до 2,75 В;
- негативний вхідний струм перетворюється у вихідну напругу у діапазоні від 250 мВ до 1,5 В;

- максимальне падіння напруги на резистивному шунті, що вмикається між входами вимірювального перетворювача, складає ± 25 мВ.

2.4.2 Обґрунтування вибору мікросхеми INA213

У схемі перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу використовуються дві мікросхеми: мікросхема вимірювального підсилювача INA213 та мікросхема прецизійного джерела напруг REF2030.

Мікросхема INA213 для роботи у перетворювачі вибрана із наступних міркувань: підсилювач має вхід, куди подається опорна напруга VREF. При цьому відбувається зміщення вихідного каскаду вимірювального підсилювача для того, щоб він міг розрізняти позитивні і негативні струми.

Крім того, мікросхема INA213 має низьке значення зміщення нуля (типове значення ± 5 мкВ), хороші дрейфові властивості (типове значення температурного дрейфу напруги зміщення складає $0,1$ мкВ/°C), однополярне живлення, синфазний сигнал може бути нижче рівня землі (це дозволяє мати підсилювачу високу чутливість). Допустиме значення синфазного вхідного сигналу лежить у діапазоні від мінус 100 мВ до плюс 26 В. Фіксоване значення коефіцієнта підсилення за напругою дорівнює 50 (у випадку, коли для створення негативного зворотного зв'язку використовуються внутрішні прецизійні резистори).

Серед інших вимірювальних підсилювачів вибраний підсилювач INA213 має кращі властивості. Інші підсилювачі з однополярним живленням були виключені з розгляду у зв'язку з такими властивостями:

- обмеженість розмаху вихідного сигналу;
- вхідна синфазна напруга близька до землі;
- для встановлення коефіцієнта підсилення потрібні зовнішні резистори, що небажано для малого дрейфу;
- вимірювальні диференційні підсилювачі зазвичай мають коефіцієнт підсилення 1 В/В.

Отже, INA213B є оптимальним вибором для досліджуваного перетворювача.

Структурна схема мікросхеми INA213B, яка розроблена і випускається корпорацією Texas Instruments, показана на рис. 2.13. Коефіцієнт підсилення за напругою має значення 50. Опір резисторів $R_1 = R_2 = 1 \text{ МОм}$. Опір резисторів $R_3 = R_4 = 20 \text{ кОм}$.

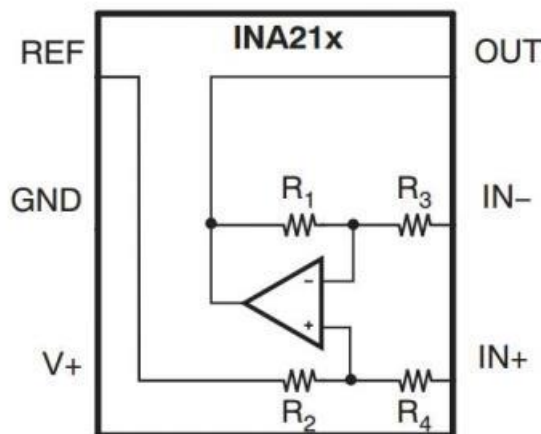


Рисунок 2.13 - Структурна схема INA213B

2.4.3 Обґрунтування вибору мікросхеми REF2030

Напруга V_{REF} та V_+ забезпечуються подачею напруг потрібного номіналу від мікросхеми REF2030, що належить до сім'ї опорних напруг REF20xx. Мікросхема REF2030 має низькодрейфові властивості та достатні вихідні потужності. На виході V_{REF} формується 3 В, а на виході V_+ напруга становить $V_{REF}/2$.

Функціональна схема мікросхеми REF2030 показана на рис. 2.14.

Як видно з функціональної схеми, струмове дзеркало на транзисторах Q_1 і Q_2 та резисторах R_5 , R_6 , R_7 формує різницю потенціалів, яка подається на входи операційного підсилювача. Особливістю струмового дзеркала є те, що на інвертувальному вході операційного підсилювача формується потенціал, значення якого не залежить від температурних коливань тому, що різниця падінь напруги на емітерних переходах транзисторів ($V_{BE1} - V_{BE2}$) має позитивний температурний

коефіцієнт, а падіння напруги на резисторі R_5 має негативний температурний коефіцієнт. В результаті температурні впливи компенсуються.

При налаштуванні мікросхем REF2030 використовується технологія e-TRIM, при якій після формування пластику корпусу технологічними методами мінімізується розбіг у параметрах транзисторів, майже усувається вплив температурного дрейфу, і, як наслідок, підвищується точність формування вихідних напруг.

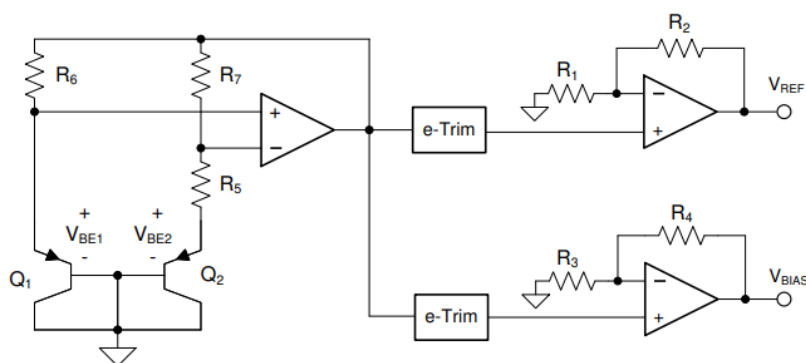


Рисунок 2.14 – Функціональна схема мікросхеми REF2030

2.4.4 Моделювання роботи перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-вимірювальної системи у напругу

Для дослідження роботи перетворювача була розроблена модель, показана на рис. 2.15.

В моделі опір шунтового резистора R_1 вибирався із наступних міркувань. Падіння напруги на шунті може бути як позитивним, так і негативним в залежності від напрямку струму, який тече через нього. За величиною вказане падіння треба обмежувати тому, що при його негативній величині синфазна напруга на вході вимірювального перетворювача може стати недопустимою.

У технічному описі мікросхеми INA213 приведена схема встановлення вхідного фільтра. Вказана схема показана на рис. 2.16.

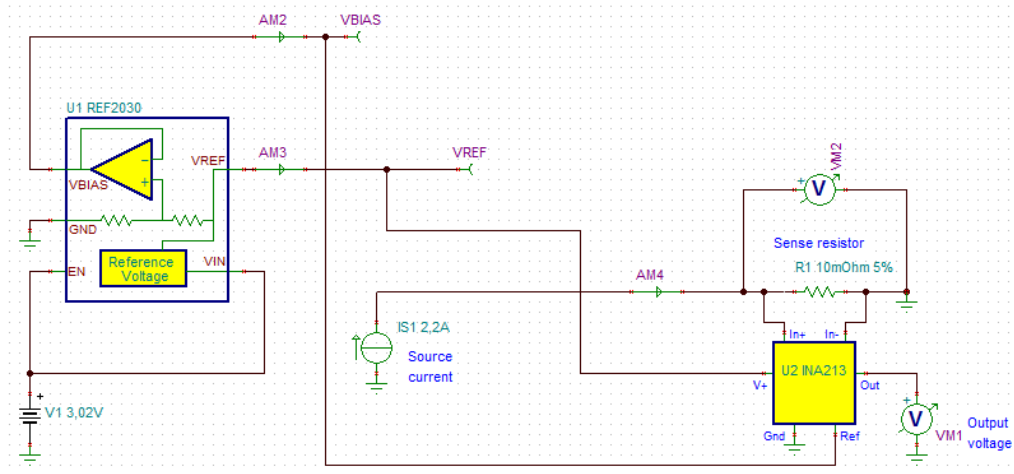


Рисунок 2.15 – Модель перетворювача струму інтерфейсу інформаційно-виміральної системи у напругу

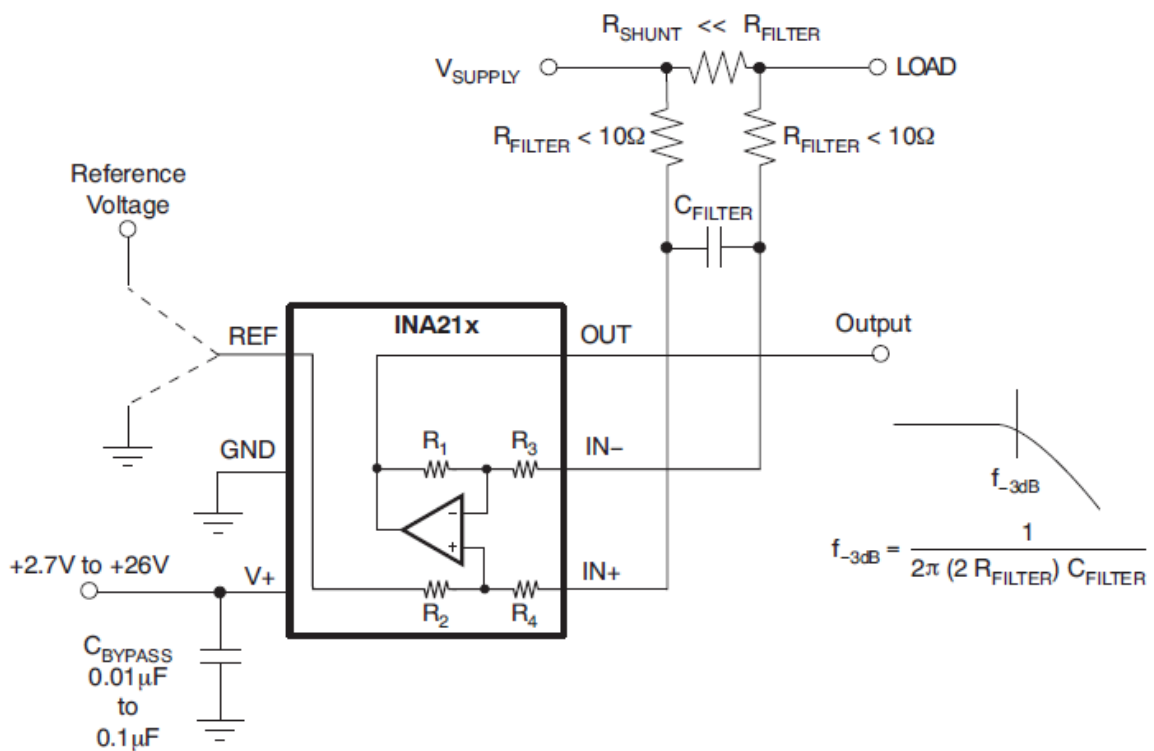


Рисунок 2.16 – Спосіб під'єднання фільтра до входів мікросхеми INA21x

З рисунку 2.16 видно, що опір резисторів фільтра має бути менше 10 Ом, а опір шунта набагато менше за опір резисторів фільтра. Тоді можна прийняти, що $R_{shunt} = 10 \text{ мОм}$.

Аналогічний результат можна отримати, якщо задати падіння напруги на шунті рівним ± 25 мВ, а діапазон змінення вхідного струму дорівнює $\pm 2,5$ А.

Тоді

$$R_{shunt\ max} = \frac{V_{shunt\ max}}{I_{in\ max}} = \frac{0,025}{2,5} = 0,01\ \text{Ом} = 10\ \text{мОм}.$$

За допомогою аналізу роботи моделі у статичному режимі за постійним струмом отримані залежності вихідної напруги VM1 та падіння напруги на шунті від вхідного струму (рис. 2.17). Як видно з рисунку, залежності є лінійними.

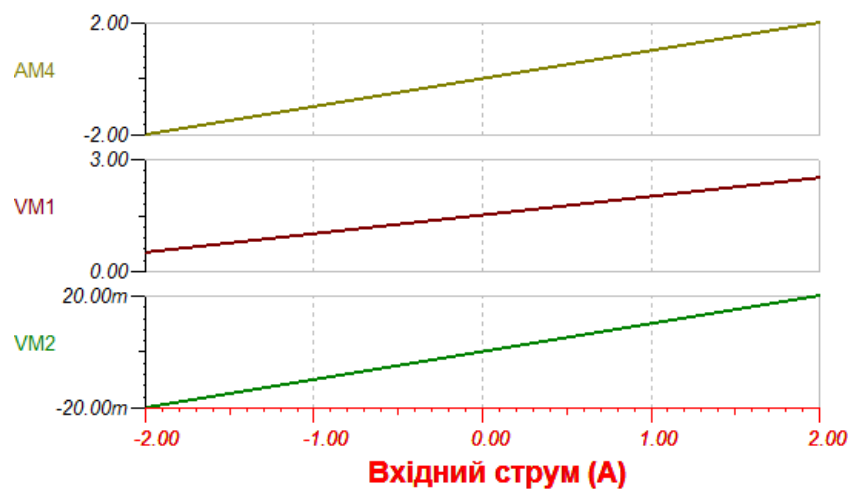


Рисунок 2.17 - Залежності вихідної напруги VM1 та падіння напруги на шунті від вхідного струму

Аналіз перехідних процесів у моделі пристрою відбувався при змінному джерелі напруги. Форма напруги джерела, що задавався, показана на рис. 2.18. Результати аналізу перехідних процесів у моделі при заданій формі напруги показані на рис. 2.19. Візири А та В фіксують значення вихідної напруги VRL в різні моменти часу. Спостерігається інерційність у формуванні вихідного сигналу (затримка встановлення постійної напруги на виході при перемиканні вхідної напруги становить приблизно 1,87 мс).



Рисунок 2.18 – Вікно редактора сигналів

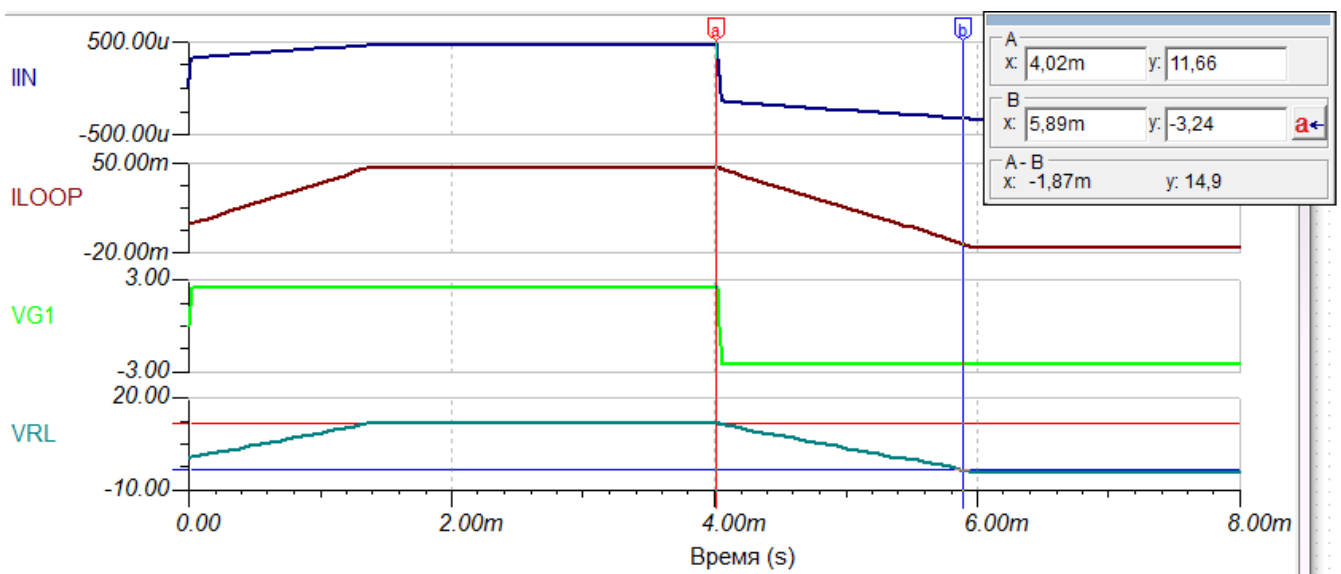


Рисунок 2.19 – Результати аналізу перехідних процесів при змінному джерелі вхідної напруги

2.4.5 Обчислення похибок вимірювання пристрою

Обчислення похибок є відповідальною та необхідною дією вимірювання.

При обчисленні сумарної похибки перетворення струму у напругу враховувалися два види похибок: похибки точності та похибки, що виникають в результаті дрейфу температури.

Для розрахунку похибок була складена програма, лістинг якої приведений у додатку А. У додатку Б представлена таблиця позначення ідентифікаторів, які використані у програмі.

При розрахунках сумарних похибок був використаний також метод середньоквадратичної (RSS) похибки. Визначення похибки у найгіршому випадку (мультиплікативний спосіб) дає завідомо завищену оцінку похибки, тоді як метод середньоквадратичної похибки пропонує більш реалістичний спосіб складання окремих складових. Цей метод ґрунтується на тому, що більшість помилок виміру, хоч і є систематичними, а не випадковими, взаємно незалежні, а отже, їх індивідуальні складові можуть комбінуватися за середньоквадратичним (RSS) принципом. Знаходження середньоквадратичної похибки вимагає, щоб кожна складова була виражена відносною величиною.

У таблиці 2.1 приведені результати розрахунку похибок, отримані за розробленою програмою.

Таблиця 2.1 - Результати розрахунку похибок пристрою

Вид похибки	Значення похибки
Сумарна похибка пристрою за параметрами точності, розрахована за мультиплікативним принципом.	$2,091 \cdot 10^{-3}$
Середньоквадратична сумарна похибка пристрою за параметрами точності.	$1,174 \cdot 10^{-3}$
Сумарна похибка пристрою за параметрами дрейфу, розрахована за мультиплікативним принципом.	$2,522 \cdot 10^{-3}$
Середньоквадратична сумарна похибка пристрою за параметрами дрейфу.	$1,624 \cdot 10^{-3}$
Сумарна похибка пристрою, розрахована за мультиплікативним принципом.	$4,614 \cdot 10^{-3}$
Середньоквадратична сумарна похибка пристрою.	$2,003 \cdot 10^{-3}$

3 АДАПТАЦІЯ ІНТЕРФЕЙСУ «СТРУМОВА ПЕТЛЯ» ПІД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ДАТЧИКИ

Термін "інтелектуальні" для первинних пристроїв був введений для тих первинних пристроїв, які у своєму складі містять мікропроцесор. Завдяки цьому інтелектуальні датчики, наприклад, можуть видавати більш точні покази завдяки використанню числових обчислень для компенсації нелінійності чутливого елемента або температурної залежності. Крім того, інтелектуальний датчик може виконувати налаштування на інший діапазон вимірювань або автоматичне калібрування та внутрішню самодіагностику.

Додаткові функції датчиків будуть працювати, якщо є комунікатор (панель налаштування) для налаштування та керування датчиком. Комунікатор можна віднести на велику відстань, якщо є послідовний зв'язок між датчиком і комунікатором. Такий зв'язок можна забезпечити по тим же дротам, по яким передаються результати вимірювання.

Обмін даними між системою керування та інтелектуальними первинними датчиками легко реалізується за допомогою протоколу HART (Highway Addressable Remote Transducer – Адресований Дистанційний Магістральний Перетворювач).

Протокол HART – це промисловий стандарт, призначений до пристосування струмової петлі 4-20 мА до цифрової комунікації. Протокол HART дозволяє передавати одночасно аналоговий і цифровий сигнали по одній парі дротів. При цьому зберігається повна сумісність та надійність існуючих аналогових ліній 4...20 мА. Особливістю HART є те, що він може працювати з різними системами керування у галузі промислової автоматизації.

При модернізаціях інформаційно-вимірювальних систем за умови використання протоколу HART можна аналогові датчики замінювати інтелектуальними цифровими. Дуже корисно використовувати протокол HART при дистанційних вимірюваннях.

Оскільки передача цифрової інформації відбувається швидше, ніж аналогової, то при використанні HART відкривається доступ до багатьох параметрів датчика. Наприклад, можуть передаватися значення змінних, діапазон вимірювання, індивідуальні параметри приладу типу дати останнього калібрування. А для інтелектуальних датчиків стає можливою безперервна самодіагностика з передачею її результатів у цифровому вигляді по струмовій петлі.

Принцип обміну даними по протоколу HART показаний на рис. 3.1.

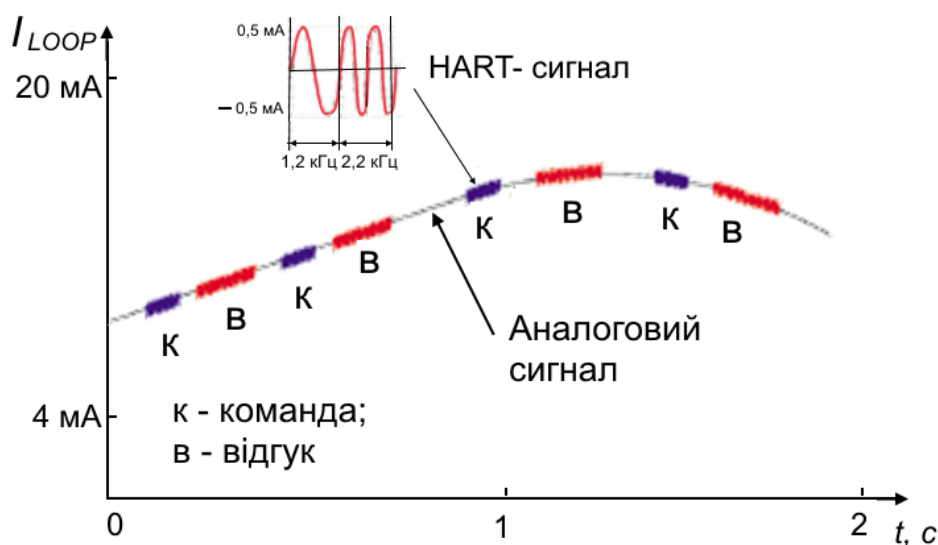


Рисунок 3.1 – Ілюстрація принципу обміну даними по протоколу HART

Протокол HART дозволяє обмін даними на швидкості 1200 Бод. Цифрові сигнали, що передаються є частотномодульованими.

Для передавання логічної одиниці використовується один період синусоїди, а для передавання логічного нуля – два неповних періоду. При передаванні логічної одиниці використовується частота 1200 Гц, логічного нуля – 2200 Гц. Оскільки середнє значення за період синусоїди дорівнює нулю, то цифровий сигнал не впливає на аналоговий сигнал.

Протокол HART побудований за принципом «ведучий – ведений». Тому первинний пристрій тільки відповідає на запит. Допустимо мати два «ведучих»: систему керування та комунікатор. До однієї лінії зв'язку можна під'єднати 15 «ведених» пристроїв. На рис. 3.2 показана структура інтерфейсу «струмова петля» з цифровим зв'язком

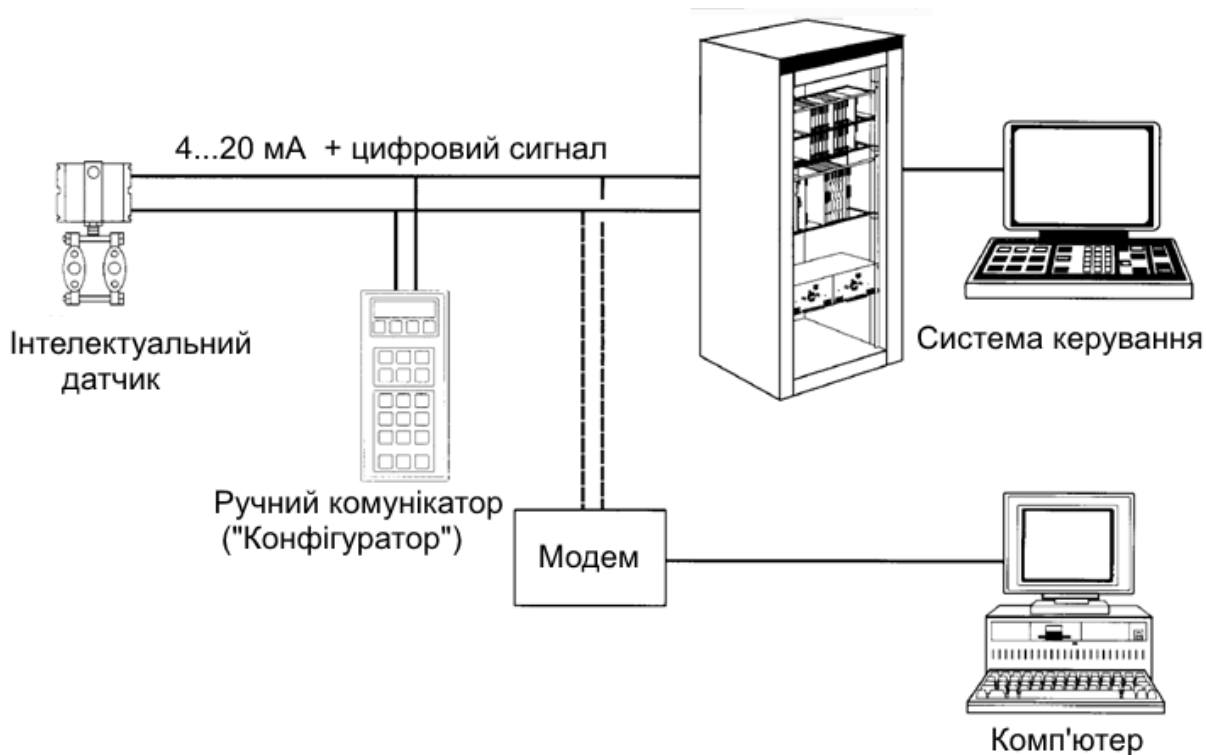


Рисунок 3.2 - Структура інтерфейсу «струмова петля» з цифровим зв'язком [17]

Команди протоколу HART бувають універсальними, застосовуваними загально та специфічними. Проективальник може самостійно вибрати команди, які є специфічними для пристрою, що під'єднується до інтерфейсу.

Для опису компонентів систем автоматизації, які підтримують протокол HART, застосовується мова опису DDL (Device Description Language). Мова DDL дозволяє достатньо просто переналагодити компоненти системи автоматизації з метою під'єднання нових пристроїв без значного змінення програмного забезпечення. Протокол HART підтримує роботу з достатньо великою кількістю датчиків різних виробників.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи здійснено вивчення та оптимізація інтерфейсу "струмова петля" для застосування в інформаційно-вимірювальних системах, в яких виконуються дистанційні вимірювання.

Основна мета дослідження полягала у підвищенні продуктивності передачі даних та забезпеченні високого рівня точності та надійності вимірювань.

У роботі були вивчені та проаналізовані різноманітні характеристики роботи інтерфейсу "струмова петля", включно з основними принципами його функціонування, впливом зовнішніх чинників, а також підходами до моделювання та вдосконалення.

Особлива увага звернена на використання в інтерфейсі "струмова петля" спеціалізованих мікросхем. Зокрема, розроблені та проаналізовані моделі двох пристроїв.

Перший пристрій є перетворювачем напруги у струм інтерфейсу струмової петлі 4...20 мА на базі прецизійної мікросхеми XTR115. Розглянута структурна схема мікросхеми XTR115 з зовнішніми підключеннями. Визначені чисельні значення параметрів пристрою. З використанням зроблених розрахунків параметрів розроблена модель пристрою. Модель безпосередньо мікросхеми XTR115 в ній представлена Spice – підсхемою, яка розроблена корпорацією Texas Instruments. Результати статичного аналізу і аналізу перехідних процесів пристрою показали, що розроблений пристрій має параметри, які відповідають вимогам інтерфейсу "струмова петля". Пристрій має лінійну залежність вихідного струму від вхідної напруги. Виконані розрахунки і результати аналізів показали можливість використання розробленого пристрою спільно з аналоговим інтерфейсом "струмова петля".

Другий пристрій - це перетворювач струму інтерфейсу "струмова петля" інформаційно-вимірювальної системи у напругу з використанням двох

спеціалізованих мікросхем. Діапазон вхідних струмів змінюється від -2,5 А до +2,5 А, а діапазон вихідної напруги - від 250 мВ до 2,75 В.

Мікросхема INA213 для роботи у перетворювачі вибрана із наступних міркувань: підсилювач має вхід, куди подається опорна напруга VREF. При цьому відбувається зміщення вихідного каскаду вимірювального підсилювача для того, щоб він міг розрізняти позитивні і негативні струми. Крім того, мікросхема INA213 має низьке значення зміщення нуля (типове значення ± 5 мкВ), хороші дрейфові властивості (типове значення температурного дрейфу напруги зміщення складає 0,1 мкВ/°C), однополярне живлення, синфазний сигнал може бути нижче рівня землі (це дозволяє мати підсилювачу високу чутливість). Допустиме значення синфазного вхідного сигналу лежить у діапазоні від мінус 100 мВ до плюс 26 В. Фіксоване значення коефіцієнта підсилення за напругою дорівнює 50 (у випадку, коли для створення негативного зворотного зв'язку використовуються внутрішні прецизійні резистори). Тому INA213 є оптимальним вибором для досліджуваного перетворювача. Таким же обґрунтованим є вибір другої мікросхеми пристрою: прецизійного джерела живлення REF2030.

Після розробки пристрою була розроблена його модель, призначена для схемотехнічного аналізу. Результати моделювання роботи пристрою показали його працездатність. В ході моделювання виявилася інерційність при перетворенні струму з крутими фронтами у напругу.

Також був зроблений розрахунок похибок пристрою. В результаті виявлено, що середня квадратична похибка не перевищує $2,003 \cdot 10^{-3}$ відносні одиниці, тобто є малою.

Для підключення до інтерфейсу "струмова петля" сучасних інтелектуальних датчиків з цифровими виходами була розглянута можливість передачі по лінії зв'язку цифрової інформації за вже розробленим протоколом HART. В результаті зроблений висновок щодо можливості оптимізації інтерфейсу "струмова петля" за рахунок одночасної передачі по ньому аналогових і цифрових сигналів.

Результати виконаної роботи має сенс використовувати у додатках з практичним застосуванням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. **Терещенко, Т. О.** Розподілені мікропроцесорні системи: конспект лекцій [Електронний ресурс] / Т. О. Терещенко.— Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 192 с. Режим доступу:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41034/1/RMS_konspect.pdf.
2. Відкриті системи [Електронний ресурс] / Режим доступу:
https://pidru4niki.com/1439022147715/informatika/vidkriti_sistemi.
3. ДСТУ ІЕС 60870-3:2005. Пристрої та системи телемеханіки. Частина 3. Інтерфейси (електричні характеристики) (ІЕС 60870-3:1989, IDT).
4. **Єрмілова, Н. В.** Навчальний посібник до самостійного вивчення курсу "Основи метрології і електричних вимірювань" [Текст] / Н.В. Єрмілова, С.Г. Кислиця. - Полтава: ПолтНТУ, 2017. - 141 с.
5. **Шевкопляс, Борис.** Особенности управления потоками данных в интерфейсах семейства RS [Текст] / Борис Шевкопляс. — Схемотехника, № 9 2004. - С. 34-36.
6. **Сухман, С. М.** Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений [Текст] / С.М. Сухман, А.В. Бернов, Б.В. Шевкопляс.— М.: Эко-Трендз, 2003.
7. Програмне керування [Електронний ресурс] / Режим доступу:
https://leksika.com.ua/17100815/ure/programne_keruvannya.
8. Рабочая группа Ethernet IEEE 802.3. Режим доступа: <https://www.ieee802.org/3/>
9. IEEE-802.3 [Електронний ресурс] / Режим доступу:
http://uk.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.3.
10. USB [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/USB>.
11. Texas Instruments Incorporated. Product REF2025, REF2030, REF2033, REF2041. SBOS600B –MAY 2014–REVISED JULY 2014 [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.ti.com.
12. Texas Instruments Incorporated. INA210 INA211 INA212 INA213 INA214. SBOS437–MAY 2008 [Електронний ресурс] / Режим доступу: www.ti.com.

13. **Кветний, Р.** Основи техніки передавання інформації. Підручник. [Текст] / Р. Кветний, М. Компанець, С. Кривогубченко, А. Кулик. – Вінниця: УНІ-ВЕРСУМ – Вінниця, 2002. -358 с.
14. **Магро, В. І.** Вимірювання сигналів у радіотехніці: навч. посіб. [Текст] / В.І. Магро, В. Д. Рябчій, О. Ю. Гусев; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 191 с.
15. **Петрова, О. О.** Моделювання схем в програмному середовищі Electronic Workbench : навч. посібник [Текст] / О. О. Петрова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 128 с.
16. МИ 2168-91. ГСИ. Системы измерительные информационные. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов по метрологическим характеристикам линейных аналоговых компонентов [Текст] / Львов, 1991.
- 17 HART протокол первичной связи. Технический обзор.
- 18 **Довгальок, Б. П.** Конспект лекцій з дисципліни «Контроль, діагностика і пристрої спряження в електронних системах» [Текст] / Б.П. Довгальок, Кам'янське: ДДТУ, 2018, 61с.

ДОДАТОК А

Лістинг програми розрахунку похибок

Вхідні дані

$$\begin{aligned}
 R_{\text{shunt}} &:= 10 \cdot 10^{-3} \, \Omega \\
 I_{\text{load_max}} &:= 2.2 \, \text{A} \quad I_{\text{load_min}} := -2.2 \, \text{A} \\
 V_{\text{shunt_max}} &:= R_{\text{shunt}} \cdot I_{\text{load_max}} \, \text{V} \quad V_{\text{shunt_max}} = 0.022 \, \text{V} \\
 V_{\text{shunt_min}} &:= R_{\text{shunt}} \cdot I_{\text{load_min}} \, \text{V} \quad V_{\text{shunt_min}} = -0.022 \, \text{V} \\
 \text{FSR} &:= V_{\text{shunt_max}} - V_{\text{shunt_min}} = 0.044 \, \text{V} \\
 T_{\text{ambient}} &:= 25 \, ^\circ\text{C} \quad T_{\text{max}} := 125 \, ^\circ\text{C} \quad \Delta T := T_{\text{max}} - T_{\text{ambient}} = 100 \, ^\circ\text{C} \\
 \alpha_{\text{shunt_tol}} &:= 0.1 \, \% \quad \alpha_{\text{shunt_tol_1}} := 1 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{\text{sunt_drift}} := 15 \cdot 10^{-6} \, \frac{1}{^\circ\text{C}} \\
 E_{\text{shunt_tol}} &:= \alpha_{\text{shunt_tol_1}} \quad E_{\text{shunt_drift}} := \Delta T \cdot \delta_{\text{sunt_drift}} = 1.5 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Розрахунок похибок, які вносить мікросхема INA213

INA213 ERROR

$$\begin{aligned}
 V_{\text{os_INA}} &:= 5 \cdot 10^{-6} \, \text{V} \quad V_{\text{s_INA_spec}} := 5 \, \text{V} \quad V_{\text{s_INA_sys}} := 3 \, \text{V} \\
 V_{\text{os_INA_PSRR}} &:= 0.1 \cdot 10^{-6} \, \frac{\text{V}}{\text{V}} \quad \alpha_{\text{INA_GE}} := 0.02 \, \% \\
 V_{\text{cm_INA_spec}} &:= 12 \, \text{V} \quad V_{\text{cm_sys}} := 0 \, \text{V} \\
 \text{dB}_{120} &:= \frac{1}{\frac{120}{10^{20}}} = 1 \times 10^{-6} \quad V_{\text{os_INA_CMRR}} := \text{dB}_{120} = 1 \times 10^{-6} \, \frac{\text{V}}{\text{V}} \\
 E_{\text{INA_Vos}} &:= \frac{V_{\text{os_INA}}}{\text{FSR}} = 1.136 \times 10^{-4} \\
 E_{\text{INA_PSRR}} &:= (V_{\text{s_INA_spec}} - V_{\text{s_INA_sys}}) \cdot \frac{V_{\text{os_INA_PSRR}}}{\text{FSR}} \\
 E_{\text{INA_PSRR}} &= 4.545 \times 10^{-6} \\
 E_{\text{INA_GE}} &:= \frac{\alpha_{\text{INA_GE}}}{100} = 2 \times 10^{-4} \\
 E_{\text{INA_CMRR}} &:= \frac{(V_{\text{cm_INA_spec}} - V_{\text{cm_sys}}) \cdot V_{\text{os_INA_CMRR}}}{\text{FSR}} \\
 E_{\text{INA_CMRR}} &= 2.727 \times 10^{-4} \\
 \text{Drift} \\
 \delta_{\text{INA_drift_GE}} &:= 3 \cdot 10^{-6} \, \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad V_{\text{os_INA_drift}} := 0.1 \cdot 10^{-6} \, \frac{\text{V}}{^\circ\text{C}} \\
 E_{\text{INA_drift_GE}} &:= \Delta T \cdot \delta_{\text{INA_drift_GE}} = 3 \times 10^{-4} \\
 E_{\text{INA_drift_Vos}} &:= V_{\text{os_INA_drift}} \cdot \frac{\Delta T}{\text{FSR}} \quad E_{\text{INA_drift_Vos}} = 2.273 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Розрахунок похибок, які вносить мікросхема REF2030

$$\begin{aligned}
 &\text{REF2030 ERROR} \\
 &\alpha_{\text{REF_output}} := 0.05 \quad \% \quad \delta_{\text{REF_drift_output}} := 3 \cdot 10^{-6} \quad \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \\
 &E_{\text{REF_output}} := \frac{\alpha_{\text{REF_output}}}{100} \quad E_{\text{REF_output}} = 5 \times 10^{-4} \\
 &E_{\text{REF_drift}} := 165 \cdot \delta_{\text{REF_drift_output}} = 4.95 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Розрахунок середньоквадратичної похибки системи за параметрами точності

$$\begin{aligned}
 &\text{SYSTEM ERROR} \\
 &E_{\text{accuracy_RSS}} := \sqrt{(E_{\text{REF_output}}^2 + E_{\text{INA_CMRR}}^2 + E_{\text{INA_GE}}^2 + E_{\text{INA_PSRR}}^2 + E_{\text{INA_Vos}}^2 + E_{\text{shunt_tol}}^2)} \\
 &E_{\text{accuracy_RSS}} = 1.174 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Розрахунок похибки системи за мультиплікативним принципом за параметрами точності

$$\begin{aligned}
 &E_{\text{accuracy_total}} := E_{\text{REF_output}} + E_{\text{INA_CMRR}} + E_{\text{INA_GE}} + E_{\text{INA_PSRR}} + E_{\text{INA_Vos}} + E_{\text{shunt_tol}} \\
 &E_{\text{accuracy_total}} = 2.091 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Розрахунок середньоквадратичної похибки системи за параметрами температурного дрейфу

$$\begin{aligned}
 &\text{Drift} \\
 &E_{\text{drift_RSS}} := \sqrt{E_{\text{REF_drift}}^2 + E_{\text{INA_drift_Vos}}^2 + E_{\text{INA_drift_GE}}^2 + E_{\text{shunt_drift}}^2} = 1.624 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Розрахунок похибки системи за мультиплікативним принципом за параметрами температурного дрейфу

$$E_{\text{drift_total}} := E_{\text{REF_drift}} + E_{\text{INA_drift_Vos}} + E_{\text{INA_drift_GE}} + E_{\text{shunt_drift}} = 2.522 \times 10^{-3}$$

Розрахунок сумарної середньоквадратичної похибки системи та сумарної похибки, розрахованої за мультиплікативним принципом

$$\begin{aligned}
 &\text{TOTAL} \\
 &E_{\text{total_RSS}} := \sqrt{E_{\text{accuracy_RSS}}^2 + E_{\text{drift_RSS}}^2} = 2.003 \times 10^{-3} \\
 &E_{\text{total}} := E_{\text{accuracy_total}} + E_{\text{drift_total}} = 4.613 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

ДОДАТОК Б

Позначення, прийняті у програмі додатку А

У таблиці Б.1 показана відповідність ідентифікаторів, що використані у програми додатка А, змінним.

Таблиця Б.1 – Відповідність ідентифікаторів змінним

Назва змінної	Ідентифікатор	Одиниці вимірювання
Опір шунта.	R_shunt	Ом
Максимальний і мінімальний струми навантаження.	I_load_max, I_load_min	А
Максимальне і мінімальне падіння напруги на шунті.	V_shunt_max, V_shunt_min	В
Діапазон змінення падіння напруги на шунті.	FSR	В
Нормальна, максимальна температури і діапазон змінення температури.	T_ambient, T_max, ΔT	°C
Відносні коефіцієнти змінення опору шунта за точністю та за дрейфом.	α_{shunt_tol} , α_{shunt_drift} , δ_{shunt_drift}	%, в. о., 1/°C
Відносна похибка точності опору шунта та відносна похибка його опору за рахунок дрейфу температури.	E_shunt_tol, E_shunt_drift	в. о.
Напруга зміщення нуля та типова напруга живлення INA213.	V_os_INA, V_s_INA_spec	В
Напруга живлення мінімальна, похибка від зміни напруги живлення.	V_s_INA_sys, V_os_INA_PSR	В, в. о.
Відносна похибка коефіцієнта підсилення INA213.	α_{INA_GE}	%
Позитивна і негативна напруги живлення INA213.	V_cm_INA_spec, V_cm_sys	В

Продовження таблиці Б1

Коефіцієнт подавлення синфазного сигналу INA213.	Vos_INA_CMRR	В. О.
Відносна похибка напруги зміщення та відносна похибка від змінення напруги живлення.	E_INA_Vos, E_INA_PSRR	В. О.
Відносні похибки коефіцієнта підсилення та коефіцієнта подавлення синфазного сигналу.	E_INA_GE, E_INA_CMRR	В. О.
Коефіцієнти температурних дрейфів коефіцієнта підсилення за напругою та напруги зміщення нуля INA213.	δ _INA_drift_GE, Vos_INA_drift	1/°C, В/°C
Відносні похибки коефіцієнта підсилення за напругою та напруги зміщення нуля від дрейфу температури мікросхеми INA213.	E_INA_drift_GE, E_INA_drift_Vos	В. О.
Відносна похибка точності у процентах та коефіцієнт температурного дрейфу вихідної напруги мікросхеми REF2030.	α _REF_output, δ _REF_drift_output	%, 1/°C
Відносні похибки точності та температурного дрейфу вихідної напруги мікросхеми REF2030.	E_REF_output, E_REF_drift	В. О.
Похибки точності: середня квадратична та сумарна.	E_accuracy_RSS, E_accuracy_total	В. О.
Похибки температурного дрейфу: середня квадратична та сумарна.	E_drift_RSS, E_drift_total	В. О.
Сумарна середня квадратична похибка системи.	E_total_RSS	В. О.
Сумарна похибка системи.	E_total	В. О.