

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет заочний
Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА НА ТЕМУ:

«Завадостійкий пристрій обліку газу»

Виконав студент

гр. ЕСдн – 61п

Масьома Б. А.

Керівник проекту

Гапич В. М.

Завідувач кафедри

Опанасюк А.С.

Суми 2020 р

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Специфіка обліку газу	7
1.1 Первинні перетворювачі	8
2 Аналіз факторів, що впливають на дисбаланс обліку газу	10
2.1 Похибка вузла обліку газу	10
2.2 Урахування впливу температури на похибку виміру	11
2.3 Вплив тиску газу на похибку при вимірюванні	12
2.4 Врахування обмежень динамічного діапазону	14
3 Вимірювання витрати на основі перепаду тиску	16
3.1 Розрахунок діапазону змін перепаду тиску на звужувальному пристрої	25
4 Побудова систем обліку	29
4.1 Основні компоненти сучасних електронних систем обліку енергоресурсів	29
4.2 Сумісність інтерфейсів	31
4.3 Застосування кодування в системах обліку	33
4.4 Деякі практично застосовані коди, що виправляють помилки	40
4.4.1 Код Хемінга	40
4.4.2 Код Ріда-Соломона	41

4.4.3 Каскадне кодування	44
4.4.4 Циклічна контрольна сума як компонент каскадного кодування	45
5 Дослідження можливостей збільшення швидкості роботи програмної реалізації алгоритму кодування Хемінга	49
6 Розробка електронної системи обліку газу	56
6.1 Опис принципової схеми вимірювального перетворювача	56
6.2 Розрахунок параметрів електронних компонентів витратоміра	58
6.3 Опис принципової схеми інтелектуального перетворювача інтерфейсів	63
Висновок	66
Література	68
Додатки	

ВСТУП

Актуальність роботи: Вичерпність природних запасів газу та постійне зростання ціни на нього вимагають підвищення точності обліку газу при його транспортуванні та розподілу, а особливо при транспортуванні на великі відстані по магістральних газопроводах. Відтак чимало вітчизняних та закордонних виробників приділяють чималу увагу розробці нових систем обліку та використанню в них новітніх технологій. Зокрема, одна з провідних українських компаній на ринку систем обліку ТОВ “ДП Укргазтех”, яка більше 15 років успішно постачає надточні системи обліку для українських та закордонних газотранспортних компаній, чимало зусиль приділяє розробці точних та надійних систем саме для магістральних газопроводів високого тиску.

У системах технологічного й комерційного обліку енергоресурсів, які застосовуються у промисловості, задача захисту даних від спотворювання стоїть особливо гостро. Спотворювання можуть виникати як при передачі даних, так і у процесі їхнього зберігання, і обумовлені ненадійністю каналів передачі даних, жорсткими умовами експлуатації устаткування (у т. ч. наявністю потужних індустриальних завод). Може мати місце також втручання людини в процес передачі й зберігання даних.

Мета роботи полягала у виборі оптимальних методів обліку газу на магістральних газопроводах та розробці власної конкурентоспроможної системи обліку газу.

Досягнення зазначеної мети вимагало розв’язання наступних завдань: вибір оптимального методу вимірювання витрати газу в магістральному газопроводі; аналіз факторів, що впливають на точність результату вимірювання витрати газу; огляд та аналіз можливих завод при зберіганні та передачі результатів вимірювання.

Новизна роботи полягає в застосуванні завадостійкого кодування даних в процесі їх зберігання в енергонезалежній пам'яті обчислювача витрати та при їх пересиланні між компонентами системи. На відміну від більшості існуючих систем, де використовується тільки контроль цілості даних за допомогою звичайних або циклічних контрольних сум, застосування завадостійкого кодування дозволяє зменшити вірогідність безповоротних втрат даних при їх зберіганні, та в деяких випадках зробити можливим використання каналів зв'язку без підтвердження прийому кожного пакету даних.

Об'єктом дослідження було вдосконалення алгоритму кодування Хемінга з метою підвищення швидкості його програмної реалізації з метою зменшення обчислювального навантаження на процесор та відповідно зменшення енергоспоживання під час автономної роботи витратоміру.

1 СПЕЦИФІКА ОБЛІКУ ГАЗУ

При транспортуванні й розподілові газу змінюються його параметри: тиск, температура, а іноді й компонентний состав, тому що в державний газо господарський комплекс може надходити газ із різних родовищ.

Обсяги споживання газу мають яскраво виражену сезонну залежність: взимку споживання газу різко зростає, а влітку – падає. Для забезпечення безперебійної подачі газу під час зимових піків споживання, провадиться акумулювання запасів газу в підземних газосховищах у літній період.

Весь цей складний і розгалужений газо господарський комплекс – від родовища і до кінцевого споживача, повинен бути оснащений наскрізною багаторівневою системою обліку, що виконує наступні функції:

- вимір обсягу газу для розрахунків між учасниками ринку;
- технологічний контроль (параметри газу, втрати, позаштатні ситуації).

Оптимізація розподілу й економія споживання газу, достовірна й прозора система виміру й обліку газу, стають усе більш актуальними у зв'язку зі зростанням цін на газ, збільшенням учасників газового ринку, ускладненням газо господарського комплексу в цілому. Головною метою даної концепції є обґрунтування створення системи обліку газу, що забезпечує:

- високий рівень достовірності виміру обсягу газу на всіх рівнях розподілу й споживання – від магістрального газопроводу до кінцевого споживача – як основи для комерційних розрахунків;

- можливість її ефективного використання для вдосконалювання технологічного контролю, і, як наслідок, зниження втрат та інших непродуктивних витрат, виробітки й застосування гнучкої тарифної політики, спрямованої на економію споживання газу.

Ефективна система виміру й обліку обсягу газу на всіх рівнях є базою для переходу до виміру й обліку енергетичної цінності газу, як основного параметра для комерційних розрахунків.

Для країн-імпортерів газу, структуру транспортування й розподілу газу можна умовно зобразити, як дворівневу систему:

Рівень 1 - газотранспортні компанії (Трансгази)

Рівень 2 - газорозподільчі організації (ГРО) і великі споживачі газу від магістральних газопроводів

Рівень 1 має певні обмеження, зокрема:

– прикордонні вузли обліку на вході магістрального газопроводу в країну й на виході із країни, у випадку, якщо магістральний газопровід є транзитним;

– газорозподільчими станціями (ГРС) на відводах до ГРО й великих споживачів в межах країни.

Рівень 2 зазнає таких обмежень:

– ГРС на входах від магістральних газопроводів;

– кінцевими споживачами на периферії.

До рівня 2 також належать великі споживачі газу, що одержують газ безпосередньо з магістральних газопроводів. До таких споживачів належать великі ТЕЦ, гірничо-збагачувальні комбінати, металургійні комбінати.

На ГРС відбувається редукування газу, тобто зміна його фізичних параметрів – тиску й щільності. Магістральні газопроводи проектується на абсолютний тиск 55 та 75 бар.

Вимір обсягу й облік газу на рівні 1 провадиться на прикордонних вузлах обліку на вході й виході, на всіх відводах до ГРС.

Вимір обсягу й облік газу на рівні 2 здійснюється, відповідно, на вході (ГРС або відвід від ГРС) і на периферії у кінцевих споживачів.

1.1 Первинні перетворювачі

У наш час для виміру витрати газу використовуються первинні перетворювачі в основному ротаційного типу (у т.ч. турбінні), мембранного типу (на низьких тисках), і на основі перепаду тиску на звужувальному пристрої (середні й високі тиски). Є також витратоміри, засновані на принципі температурного зносу, ультразвукові та ін., але через високу складність виготовлення, калібрування й обслуговування, невисоку надійність та інші фактори, вони поки не отримали настільки широкого розповсюдження в якості вимірювачів витрат газу, як перші три типи.

Магістральні газопроводи належать до газопроводів високого тиску. Найбільш відомі витратоміри ротаційного типу при використанні в таких важких умовах мають малий термін служби, а також є достатньо складними в обслуговуванні та ремонті. Особливість магістральних газопроводів також полягає у тому, що тиск та витрата газу в них є відносно стабільними, тому саме на магістральних газопроводах є можливим і доцільним використання витратомірів на основі перепаду тиску. Саме цей принцип і закладено в основу розробки системи обліку, якій присвячено цю роботу.

2 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДИСБАЛАНС ОБЛІКУ ГАЗУ

2.1 Похибка вузла обліку газу

Розглянемо вплив факторів похибки виміру та приведення до стандартних умов обсягу газу, що діють на вузлі обліку.

Обсяг газу, обмірюваний лічильником газу, приводиться до стандартних умов за формулою:

$$V_c = V P_c Z_c / (P_c T)$$

де V — обсяг газу, обмірюваний лічильником;

P — абсолютний тиск газу в трубопроводі;

Z_c — фактор стисливості при стандартних умовах (P_c , T_c);

T_c — температура газу при стандартних умовах (293,5 K);

P_c — абсолютний тиск газу при стандартних умовах (1,01325 бар).

З формули видно, що облік температури й тиску є необхідними умовами виміру обсягу газу й приведення його до стандартних умов.

Зменшення впливу на дисбаланс обліку похибки виміру, що зумовлена відносною похибкою лічильника, досягається шляхом вибору приладу підвищеного класу точності.

Турбінні й ротаційні лічильники провідних фірм-виробників, таких як Schlumberger, Elster, Dresser мають дуже незначну систематичну складову похибки, тому при калібруванні цих лічильників крива похибки цілком укладається в діапазон 0,5%, а при зниженні кратності вимірюваних витрат Q_{\min}/Q_{\max} до 1:10 можливо відкалібрувати ці лічильники в межах

0,3%. Такі лічильники використовуються як майстер-лічильники в калібрувальних стендах.

Вимоги до класу точності приладів обліку повинні визначатися, в першу чергу, витратою газу. Що більше витрата газу, який проходить через прилад обліку, то вищим має бути клас точності.

Найбільш відповідними типами приладів обліку для верхніх рівнів газорозподільчих організацій є турбінні й ротаційні лічильники.

2.2 Урахування впливу температури на похибку виміру

Похибка виміру обсягу газу значною мірою залежить від температури – газ змінює свій обсяг приблизно на 1% при зміні температури на 3 градуси:

$$\delta V_c \approx -0,34 \delta T$$

де δV_c — відносна похибка розрахунку обсягу газу в стандартних умовах;

δT — абсолютна похибка виміру температури газу в робочих умовах (°K).

З огляду на те, що температура газу в трубопроводі в різну пору року може залежно від положення трубопроводу змінюватися в широких межах (від -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$), відсутність вимірювання температури газу й відповідно урахування поправки об'єму газу від температури може призводити до більших похибок у розрахунках обсягу газу в стандартних умовах.

Для зменшення похибки розрахунку об'єму газу в стандартних умовах залежно від температури газу необхідно вимірювати температуру газу в зоні лічильника газу з похибкою не більше $(0,5 \div 1)^{\circ}\text{C}$ і бажано в реальному масштабі часу (або протягом часу, поки температура газу не

змінилася більш, ніж на $0,5^{\circ}\text{C}$) вводити поправку на температуру газу. Для витрат газу понад $10 \text{ м}^3/\text{година}$ та коливанні температури газу, що проходить через прилад обліку, понад 5°C рекомендується вводити поправку за температурою.

Найбільш точним способом урахування впливу температури є застосування електронних “коректорів температури” (позначаються T), або електронних “коректорів тиску, температури та коефіцієнта стискальності” (позначаються PTZ).

Для побутових лічильників, встановлюваних усередині приміщення, вимога до температурної корекції не висуваються.

2.3 Вплив тиску газу на похибку при вимірюванні

Тиск газу прямо пропорційно змінює щільність або об'єм газу й тому відносна похибка при розрахунку газу в стандартних умовах прямо пропорційно залежить від відносної похибки у вимірюванні тиску газу:

$$\delta V_c \approx k_p \delta_p$$

де δV_c — відносна похибка при розрахунку обсягу газу в стандартних умовах;

δ_p — відносна похибка вимірювання тиску газу в робочих умовах;

k_p — коефіцієнт пропорційності.

В мережі газорозподільчих організацій газ в процесі його розподілу проходить кілька щаблів редукування. Що вищий тиск вимірюваного газу, то істотніший вплив похибки вимірювання тиску на величину дисбалансу.

Вимірювання і реєстрація тиску є обов'язковими для вимірювання обсягу газу при його подачі з магістрального газопроводу в мережу ГРО, а також на всіх вузлах обліку на ділянках високого й середнього тиску мережі ГРО (від 12 бар до 0,05 бар). При цьому рекомендований діапазон похибки при вимірюванні повинен бути в межах $0,2 \div 0,5\%$.

На всі вузли обліку, що працюють у мережах високого й середнього тиску, рекомендується встановлювати коректори PTZ.

Як показує світова практика, на мережах низького (менше 0,05 бар) тиску корекцію тиску здійснювати неефективно з наступних причин:

- коливання тиску газу в мережах низького тиску перебувають у межах 15 мбар, що викликає похибку вимірювання обсягу в межах 1,5%;
- у формулі приведення газу до стандартних умов використовується абсолютний тиск.

З огляду на, що атмосферний тиск коливається в межах, співрозмірних з коливаннями тиску, приводити газ до стандартних умов тільки по коливанню тиску газу в мережі, без урахування коливання атмосферного тиску, буде некоректно.

Споживачами газу з мережі низького тиску є переважно населення й комерційно-побутові підприємства, що часом становить тисячі й десятки тисяч вузлів обліку (включаючи квартирні лічильники). Оснащення цієї розгалуженої периферії складними приладами різко знижує надійність системи й вимагає значних коштів на її підтримку, що економічно не виправдовує збільшення врахованого об'єму газу на 1,5%. Це підтверджує сумний досвід Бритіш Газ (British Gas), що був змушений демонтувати сотні тисяч ультразвукових лічильників і замінювати їх мембранними через низьку надійність системи й високу вартість обслуговування. В мережах низького тиску проблема вирішується просто – введенням єдиного коефіцієнта до показників лічильників низького тиску (порядку $1,03 \div 1,05$),

що враховує приведення зареєстрованого лічильником обсягу до стандартних умов, свідомо перекриваючи можливі коливання тиску газу в мережі.

2.4 Врахування обмежень динамічного діапазону

Розмір дисбалансу внаслідок обмеженого динамічного діапазону вузлів обліку газу в деяких випадках може досягати 30%, що є досить значним при великих обсягах споживання.

Розглянемо три можливих способи зменшення Q_{\min} лічильника.

Способи зменшення нижньої межі динамічного діапазону вимірювання:

Спосіб 1. Ретельне вивчення об'єктів, що споживають газ від даного вузла обліку з погляду максимального споживання газу та імовірності одночасної роботи на максимальних витратах.

Таке вивчення дозволить визначити реальні максимальні потоки газу через вузол обліку й зробити правильний вибір приладу за Q_{\max} .

Спосіб 2. Установка вузлів обліку з максимально широким динамічним діапазоном.

Для вузлів обліку в мережах високого й середнього тиску рекомендується встановлювати турбінні або ротаційні лічильники з електронними коректорами по РТЗ. Турбінні лічильники провідних виробників можуть бути відкалібровані в діапазоні 1:30, а ротаційні 1:50.

На вузлах обліку мереж високого й середнього тиску, де витрати змінюються в межах понад 1:100 і великих обсягах споживання (що на практиці зустрічається досить рідко) рекомендується встановлювати більш складні вузли обліку, що складаються з двох або більше паралельних приладів (так звана "гребінка"), з різними динамічними діапазонами, що

перекриваються. У цьому випадку, залежно від зміни витрати, включається та чи інша нитка. Перемикання з однієї нитки на іншу, залежно від зміни витрати, має ефект при автоматичній реєстрації переходу витрати з діапазону одного приладу обліку в інший, тобто при наявності систем автоматичного збору й обробки інформації й керування.

У випадку створення складних вузлів обліку завжди варто підходити з точки зору економічної ефективності, тобто, окупності вкладень за рахунок обліку додаткового обсягу газу.

Спосіб 3. Даний спосіб обліку обсягу газу в максимальних діапазонах витрат можливий при втіленні принципів даної концепції – наскрізного порівняльного обліку газу. Дотримуючись цього принципу, можлива організація обліку таким чином, коли втрата через вузол обліку стає менше, ніж його Q_{\min} , то облік газу починає провадитися по приладах наступного, нижчого рівня. Ця схема може ефективно працювати при реєстрації часу переходу того чи іншого вузла обліку в зону роботи Q_{\min} що можливо при реалізації автоматизованої системи збору й обробки інформації, принаймні на першому етапі, з вузлів обліку верхніх рівнів, а надалі всіх рівнів.

Для зменшення впливу тиску й температури на похибку виміру вузли обліку мереж високого й середнього тиску треба в обов'язковому порядку оснащувати коректорами по PTZ. Вузли обліку мереж низького тиску з витратами більше $10 \text{ м}^3/\text{година}$ рекомендується оснащувати коректорами по T. Квартирні лічильники рекомендується встановлювати усередині приміщень, зменшуючи тим самим вплив температурної складової погрішності і їхнього показання використати як коефіцієнт при розподілі газу, врахованого будинковим лічильником.

2.4.1 Похибка обробки результатів вимірювань. Абсолютна похибка обробки результатів вимірювань при використанні самописів може коливатися від 1 до 5%, що є дуже істотним при великих витратах. Для

зменшення погрішності обробки даних необхідно повністю перейти на використання електронних засобів реєстрації й обробки даних.

3 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ НА ОСНОВІ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

У газовому витратомірі на основі перепаду тиску перепад тиску вимірюють за допомогою диференціального манометра. Звужувальний пристрій, що виконує функції первинного перетворювача, встановлюють у газопроводі. При протіканні через нього газу швидкість потоку у звуженому перетині підвищується в порівнянні з його швидкістю в газопроводі. Збільшення швидкості, а отже, і кінетичної енергії викликає зменшення потенційної енергії потоку у звуженому перетині. Відповідно й статичний тиск після звуження буде меншим, ніж до цього. Перепад тиску пов'язаний з витратами квадратичною залежністю. У якості звужувальних пристроїв застосовують стандартні діафрагми, що являють собою диск із отвором круглої форми, центр якого лежить на осі труби.

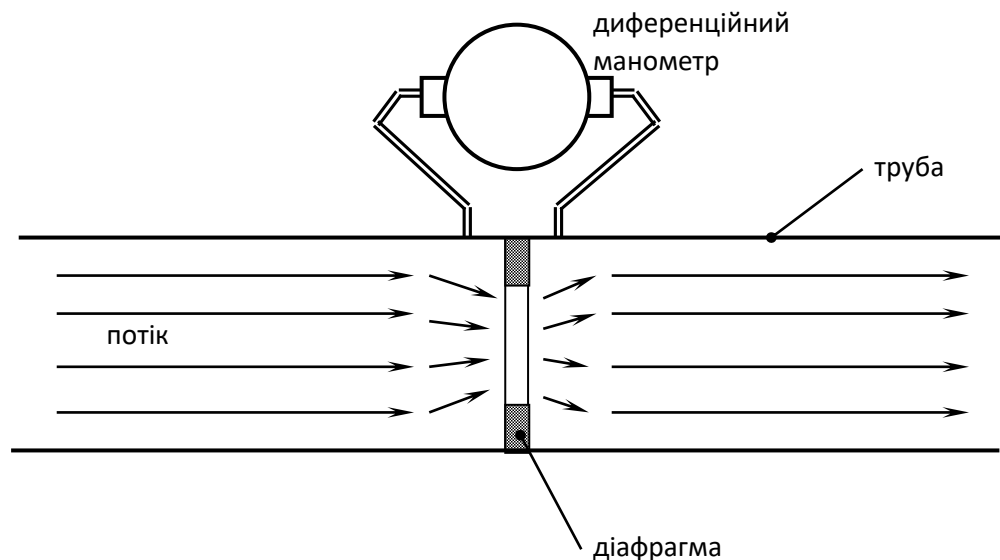


Рисунок 3.1 - Первинний перетворювач витратоміру на базі звужувального пристрою

Звуження потоку починається до діафрагми, і на певній відстані від діафрагми воно досягає мінімуму. Далі перетин постійно розширюється доти, доки не стане дорівнювати повному перетину трубопроводу. При протіканні газу через діафрагму за нею в кутах утворюється мертва зона, де внаслідок різниці тисків виникає зворотний рух газу, на подолання якого витрачається частина енергії.

Метод виміру витрати за перепадом тиску базується на наступному:

Позначимо F – площа поперечного перетину трубопроводу;

F_0 – площа отвору діафрагми.

Тоді:

$m = F / F_0$ – відносна площа звужуючого пристрою.

Для перетинів до та після звужуючого пристрою, горизонтального сталого потоку та нестисливої рідини з щільністю ρ рівняння Бернуллі буде мати вигляд:

$$(\rho v_{cp1/2}^2) - (\rho v_{cp1/2}^2) = P_1 - P_2 \quad (3.1)$$

а рівняння нерозривності:

$$F v_{cp1} = F_1 v_{cp2} = \mu' F_0 v_{cp2} \quad (3.2)$$

де $\mu' = F_1 / F_0$ – коефіцієнт стиску потоку, що залежить від типу звужуючого пристрою;

F_1 – площа перетину потоку в місці його найбільшого звуження;

v_{cp1} й v_{cp2} – середні швидкості потоку в перетинах до та після звужувального пристрою відповідно;

P_1 і P_2 – абсолютний тиск у перетинах до та після звужувального пристрою відповідно.

Розв'язуючи спільно рівняння (3.1) і (3.2), одержимо рівняння для середньої швидкості потоку після звужувального пристрою:

$$v_{cp2} = (2 (P_1 - P_2) / \rho)^{1/2} / (1 - ((\mu')^2 m^2))^{1/2} \quad (3.3)$$

Об'ємну витрату можна виразити через середню швидкість потоку:

$$Q = \mu' F_0 v_{cp2} \quad (3.4)$$

Підставивши у рівняння (3.4) значення середньої швидкості v_{cp2} , визначене за формулою (3.3), отримаємо рівняння вимірів витрати ідеальної нестисливої рідини в одиницях об'єму та маси:

$$Q = \mu' F_0 (2 (P_1 - P_2) / \rho)^{1/2} / (1 - ((\mu')^2 m^2))^{1/2} \quad (3.5)$$

$$M = \mu' F_0 (2 \rho (P_1 - P_2))^{1/2} / (1 - ((\mu')^2 m^2))^{1/2} \quad (3.6)$$

При русі газу виникають додаткові фізичні явища, такі як нерівномірний розподіл швидкостей, зміна щільності тощо. З огляду на ці обставини, а також розбіжність реальних місць відбору тисків з базовими перетинами (звичайно перепад тиску вимірюється в кутах, утворених стінками труби з торцями діафрагми), для одержання уточнених формул (3.5) і (3.6) множать на швидкісний коефіцієнт ζ , що характеризує розподіл швидкостей по перетину потоку, що виходить із звужуючого пристрою, і

коефіцієнт ε , що враховує зміну щільності потоку газу при русі через звужуючий пристрій.

Тоді рівняння витрати набувають вигляду:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 (2 (P_1 - P_2) / \rho)^{1/2} \quad (3.7)$$

$$M = \alpha \varepsilon F_0 (2 \rho (P_1 - P_2))^{1/2} \quad (3.8)$$

де
$$\alpha = \mu' \zeta / (1 - ((\mu')^2 m^2))^{1/2}$$

Ці рівняння є загальними для всіх витратомірів змінного перепаду тиску для стисливого та нестисливого середовищ.

Коефіцієнт α , що входить у рівняння (3.7) і (3.8), називається коефіцієнтом витрати. Цей коефіцієнт залежить від відносної площі m звужувального пристрою. За його допомогою враховують складні аеродинамічні явища, що відбуваються в потоці при зміні його конфігурації.

За допомогою рівняння нерозривності

$$\bar{w}_0 F_0 = \bar{w}_1 F_1 = \bar{w}_2 F_2$$

значення швидкості потоку \bar{w}_1 й \bar{w}_2 через швидкість \bar{w}_0 в отворі діафрагми площею перетину F_0 розраховують по формулах:

$$\bar{w}_1 = \bar{w}_0 \beta^2; \quad (3.9)$$

$$\bar{w}_2 = \bar{w}_0 \beta^2; \quad (3.10)$$

де β^2 - відносна площа отвору діафрагми, що розраховує по формулі

$$\beta^2 = F_0 / F_1, \quad (3.11)$$

μ - коефіцієнт звуження потоку, що розраховує по формулі

$$\mu = F_2 / F_0. \quad (3.12)$$

Підставляють \bar{w}_1 й \bar{w}_2 , виражені через швидкість \bar{w}_0 , у рівняння (3.9). Рішення цього рівняння щодо швидкості \bar{w}_0 дає наступну залежність для розрахунку масової витрати середовища:

$$q_m = \rho F_0 \bar{w}_0 = F_0 \frac{\mu}{\sqrt{\Phi_2 + \Psi_2 + \xi - \Phi_1 \beta^4 \mu^2 - \Psi_1 \beta^4 \mu^2}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}. \quad (3.13)$$

Множать і ділять праву частину рівняння на коефіцієнт швидкості входу $E = \sqrt{1/(1 - (F_0 / F_1)^2)}$, тоді одержимо наступне рівняння:

$$q_m = \rho F_0 \bar{w}_0 = F_0 C E \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}, \quad (3.14)$$

де

$$C = \frac{\mu \sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{\Phi_2 + \psi_2 + \xi - \Phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2}}. \quad (3.15)$$

Існуючі теоретичні методи розрахунку коефіцієнта витікання, як правило, не забезпечують достатню для практики точність. Тому значення коефіцієнтів витікання, стандартизовані у вітчизняному й закордонному нормативному документах, є результатом обробки високоточних численних експериментальних досліджень.

При виводі рівняння (3.14) було зроблене допущення, що щільність середовища при її плинні через звукувальний пристрій не змінюється. Це допущення справедливо для нестисливих середовищ. Для газів таке допущення може привести до значної невизначеності результатів вимірів.

Процес витікання газу через СУ можна вважати адіабатичним (відвід або підведення тепла відсутній). У цьому випадку стан газу змінюється по адіабаті:

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (3.16)$$

Записують рівняння збереження енергії в диференціальній формі:

$$d \frac{w^2}{2} + gdh + \frac{dp}{\rho} + dL_{\text{тр}} = 0, \quad (3.17)$$

де $L_{\text{тр}}$ - питома робота, витрачена на подолання сил тертя;

h - висота положення розглянутих перетинів над горизонтальною площиною, щодо якої розглядається його положення.

Після інтегрування рівняння (3.17) набуде вигляду:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + L_{\text{тр}} = 0. \quad (3.18)$$

Інтеграл у рівнянні (3.18) з урахуванням (3.16) розраховують по формулі

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right].$$

Приймають $L_{\text{тр}} = 0$, $h_1 = h_2$ і враховують рівняння нерозривності:

$$\rho_1 \bar{w}_1 = \rho_0 \bar{w}_0 \beta^2; \quad (3.19)$$

$$\rho_2 \bar{w}_2 = \rho_0 \bar{w}_0 / \mu_{\Gamma}, \quad (3.20)$$

де μ_{Γ} - коефіцієнт звуження потоку для газу.

Тоді одержують наступне рівняння для розрахунку масової витрати газу:

$$q_m = \rho_0 F_0 \bar{w}_0 = F_0 E \sqrt{2\rho_1(p_1 - p_2)} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{(p_1 - p_2)} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \frac{\mu_\Gamma^2 (1 - \beta^4)}{1 - \beta^4 \mu_\Gamma^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}. \quad (3.21)$$

Множать і ділять праву частину рівняння (3.21) на коефіцієнт витікання, тоді остаточно отримують наступне рівняння:

$$q_m = F_0 C E \varepsilon \sqrt{2\rho_1(p_1 - p_2)}, \quad (3.22)$$

де

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{(p_1 - p_2)} \left(\frac{\mu_\Gamma^2}{\mu}\right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \frac{(\Phi_2 + \psi_2 + \xi - \Phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2)}{1 - \beta^4 \mu_\Gamma^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}. \quad (3.23)$$

Для сопів можна допустити, що $\Phi_1 = \Phi_2 = \mu = \mu_\Gamma = 1$ й $\psi_1 = \psi_2 = \xi = 0$. При цьому рівняння (3.23) прийме наступний вид:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{(p_1 - p_2)} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \frac{(1 - \beta^4)}{1 - \beta^4 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}. \quad (3.24)$$

Рівняння (3.23) застосовне й для інших типів звужувальних пристроїв, але розрахунки по ньому можливі тільки при наявності інформації про параметри потоку: Φ_1 , Φ_2 , μ , μ_Γ , ψ_1 , ψ_2 , ξ . Обчислення даних величин для діафрагм є

складним, що робить рівняння (3.23) неприйнятним для практичного використання. Тому для діафрагм значення коефіцієнта розширення, наведені у вітчизняному й закордонному нормативному документах, є результатом експериментальних досліджень.

Метод заснований на створенні у вимірювальному трубопроводі за допомогою звужувального пристрою місцевого звуження потоку, частина потенційної енергії якого переходить у кінетичну енергію, середня швидкість потоку в місці його звуження підвищується, а статичний тиск стає менше статичного тиску до звужувального пристрою. Різниця тиску (перепад тиску) тим більше, чим більше витрата середовища, і, отже, вона може бути мірою витрати.

Масову витрату середовища при цьому розраховують по формулі

$$q_m = (\pi d^2 / 4) C E \varepsilon (2 \rho \Delta p)^{0,5}. \quad (3.25)$$

Коефіцієнт витікання звужувального пристрою залежить від шорсткості внутрішніх стінок вимірювального трубопроводу. Вплив шорсткості вимірювального трубопроводу, що виходить за межі, встановлені міжнародними стандартами, враховують за допомогою поправочного коефіцієнта $K_{ш}$.

Коефіцієнт витікання діафрагми залежить від радіуса вхідної кромки її отвору. Вплив радіуса вхідної кромки діафрагми, що перевищує межу, встановлену міжнародним стандартом, враховують за допомогою поправочного коефіцієнта $K_{п}$.

Масову витрату середовища в загальному випадку з урахуванням поправочних коефіцієнтів $K_{ш}$ і $K_{п}$ розраховують по формулі

$$q_m = (\pi d^2 / 4) K_{ш} K_{п} C_{Ев} (2\rho \Delta p)^{0,5} \quad (3.26)$$

На відміну від міжнародних стандартів введення поправочних коефіцієнтів $K_{ш}$ й $K_{п}$ у ГОСТ 8.586.2 і ГОСТ 8.586.3 дозволяє розширити можливість вимірювання витрати при застосуванні стандартних звужувальних пристроїв.

Зв'язок масової витрати середовища, об'ємної витрати середовища при робочих умовах й об'ємної витрати середовища, наведеної до стандартних умов, встановлює наступна формула

$$q_m = q_v \rho = q_c \rho_c \quad (3.27)$$

3.1 Розрахунок діапазону змін перепаду тиску на звужувальному пристрої

Розрахунок діапазону змін перепаду тиску на звужувальному пристрої може бути виконаний по наступним вихідним даним:

- $q_{m \min}$, $q_{m \max}$, P , ρ , μ , для газів додатково - κ ;

- β , d , D , $R_{ш}$, для діафрагм - початкове значення радіуса вхідної кромки діафрагми.

Розрахунок виконують у наступній послідовності:

а) розраховують значення верхньої межі Re_{\max} й нижньої межі Re_{\min} робочого діапазону значень Re по формулах:

$$Re_{\max} = \frac{4q_{m \max}}{\pi D \mu} ; Re_{\min} = \frac{4q_{m \min}}{\pi D \mu}$$

і перевіряють виконання нерівностей:

$$Re_{\text{в}} \geq Re_{\max} ; \quad (3.28)$$

$$Re_{\text{н}} \leq Re_{\min} , \quad (3.29)$$

де $Re_{\text{в}}$ й $Re_{\text{н}}$ - найбільше й найменше припустимі значення числа Re для обраного типу звужувального пристрою та значення β .

Якщо нерівності (3.28) і (3.29) не виконуються, то розрахунок припиняють та вибирають інший тип звужувального пристрою, для якого виконуються дані нерівності;

б) розраховують значення допоміжної величини S по формулі

$$S = \frac{8}{\rho} \left(\frac{q_{m \max}}{\pi C E K_{\text{п}} K_{\text{ш}} d^2} \right)^2 , \quad (3.30)$$

де C й $K_{\text{ш}}$ розраховують при Re_{\max} ;

в) Для газового середовища щодо невідомої величини Δp вирішують наступне рівняння:

$$\Delta p = S \varepsilon^{-2} . \quad (3.31)$$

Рішення рівняння (3.31) може бути виконано ітераційним методом:

- розраховують значення Δp_1 по формулі

$$\Delta p_1 = S / 0,9409 ;$$

- проводять обчислення на першому кроці ітерації

$$\Delta p_2 = S \varepsilon_1^{-2} * ,$$

де ε_1 - коефіцієнт розширення при $\Delta p = \Delta p_1$;

- проводять обчислення на другому кроці ітерації

$$\Delta p_3 = S \varepsilon_2^{-2} ,$$

де ε_2 - коефіцієнт розширення при $\Delta p = \Delta p_2$;

- розраховують верхню границю діапазону змін перепаду тиску на звужувальному пристрої за формулою:

$$\Delta p_{\text{в}} = \Delta p_3 + \frac{(\Delta p_3 - \Delta p_2)^2}{(2\Delta p_2 - \Delta p_3 - \Delta p_1)} ; \quad (3.32)$$

г) розраховують допоміжну величину S_1 за формулою:

$$S_1 = \frac{8}{\rho} \left(\frac{q_{m \min}}{\pi C E K_{\Pi} K_{III} d^2} \right)^2, \quad (3.33)$$

де C й K_{III} розраховують при Re_{\min} ;

д) Для газового середовища щодо невідомої величини Δp вирішують наступне рівняння:

$$\Delta p = S_1 \varepsilon^{-2}. \quad (3.34)$$

Рішення рівняння (3.34) може бути виконано методом, викладеним вище. За нижню межу діапазону змін перепаду тиску на звужувальному пристрої приймають результат розрахунку.

4 ПОБУДОВА СИСТЕМ ОБЛІКУ

4.1 Основні компоненти сучасних електронних систем обліку енергоресурсів

Сучасні електронні системи обліку енергоресурсів мають наступні вузли: первинні перетворювачі, обчислювач, енергонезалежна пам'ять та інтерфейс зв'язку. Часто також можуть бути в наявності засоби індикації та керування, та інше.

До складу систем обліку також можуть входити: системи збору інформації (на базі ПЕОМ або без неї), засоби зв'язку, принтери та інше.

До багатьох вузлів систем обліку висуваються додаткові вимоги, наприклад, низьке власне споживання електроенергії. Особливо важлива ця вимога до приладів обліку газу, де спостерігається тенденція використання автономних хімічних джерел живлення (батареї) навіть тоді, коли є можливість отримувати живлення від зовнішніх джерел. Це пов'язано з певними ускладненнями, пов'язаними з підводом живлення в "небезпечну зону" (зону, де можливий витік газу, тобто безпосередньо біля газопроводу чи інших приладів, до нього приєднаних).

До складу первинних перетворювачів функціонально належать також аналого-цифрові перетворювачі, хоч конструктивна вони нерідко об'єднані з обчислювачем.

Енергонезалежна пам'ять має зберігати відомості про спожиті енергоресурси протягом не менше кількох років. Цім вимогам відповідає сучасна пам'ять з електричним програмуванням та стиранням типу Flash, але вона має обмежену кількість стирань ($10^4 \div 10^5$), що вимагає застосування разом з нею пам'яті Fram, або певних алгоритмів запису, які дозволяють зменшити кількість перезаписів в основну Flash-пам'ять. В окремих випадках використовується вбудована в мікроконтролер енергонезалежна пам'ять.

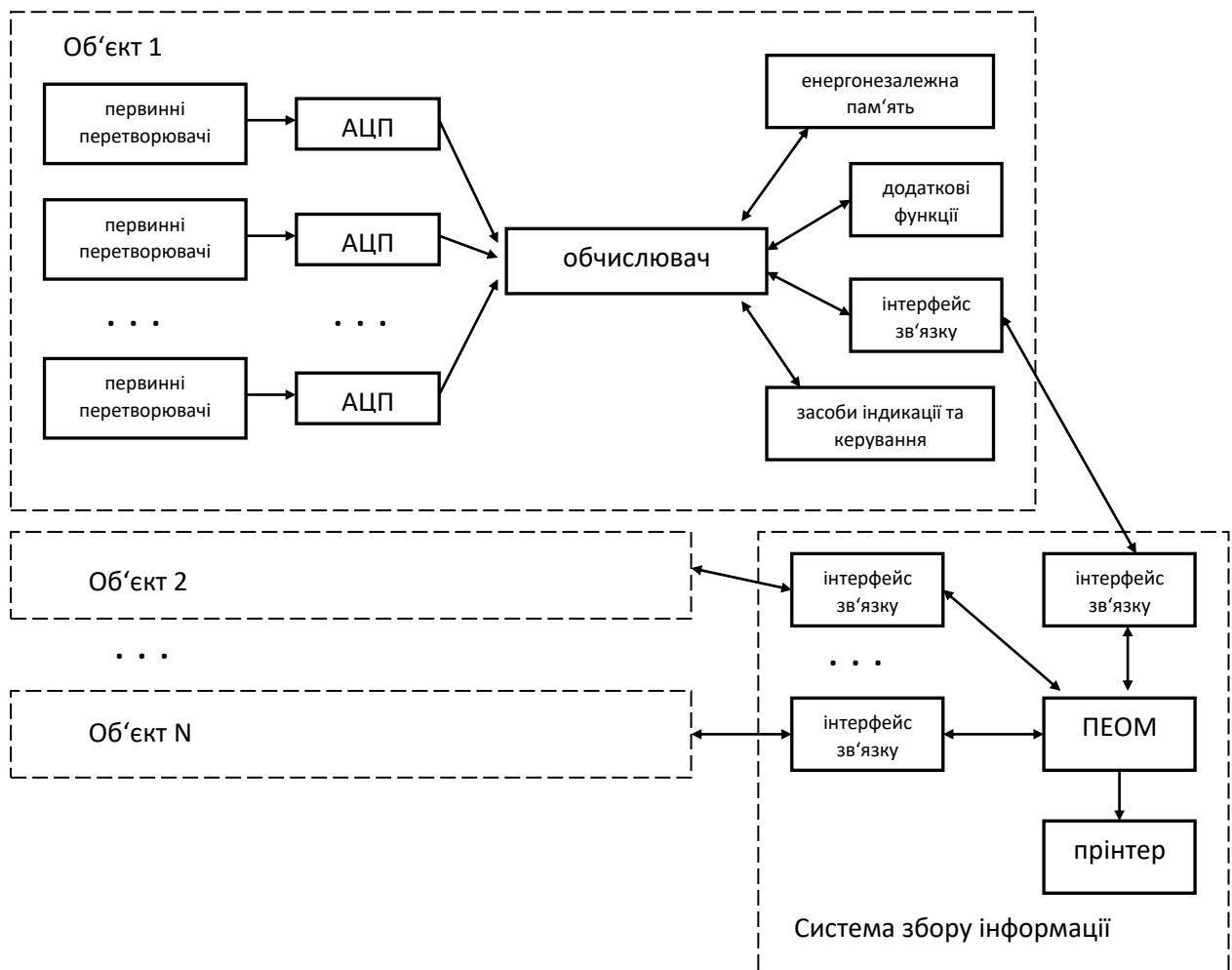


Рисунок 4.1 - Типовий склад системи обліку

Іноді використовується статична оперативна пам'ять (SRAM) з живленням від окремого хімічного джерела (батарейки, акумулятора,

іоністора тощо), але зараз кількість таких систем суттєво зменшилась через високу вартість як самої статичної оперативної пам'яті (порівняно з Flash), відносно невеликий її об'єм, так і вартість самих додаткових джерел живлення.

В приладах комерційного обліку запис в енергонезалежну пам'ять супроводжується кодуванням, яке дозволяє знаходити (а іноді і виправляти) помилки, пов'язані з втратою частини інформації в результаті збоїв живлення та іншими нестаціонарними впливами. Досить часто інформація додатково шифрується, щоб запобігти зловмисним діям.

Обчислювач зазвичай виконується на базі одно кристальних мікроконтролерів. З одного боку він повинен мати достатню швидкість для обчислення результатів вимірів, з іншого – низьке (а у випадку автономного живлення – наднизьке) власне споживання електроенергії. Найбільш перспективними з точки зору співвідношення таких показників, як обчислювальна потужність, економічність та вартість, на сьогодні є обчислювачі на базі мікроконтролерів сімейств MSP430 (виробник – Texas Instruments), C8051Fxxx (SiLabs, колишня Cygnal), STM32 (ST Microelectronic, колишня SGS-Thomson) та інші.

Інтерфейси зв'язку використовуються як диференційні (RS485, RS422), так і потенціальні (RS232, MicroLAN, CAN). Крім того, часто використовуються безпроводні інтерфейси (зазвичай радіозв'язок або GPRS/GSM).

Серед додаткових функцій найбільш поширеними є засоби індикації (здебільшого, рідкокристалічні індикатори) та керування (клавіатури або набір окремих кнопок).

Іноді пристрої обліку мають можливість запису на з'ємні носії інформації (зазвичай, SD/MMC карти пам'яті, або власні спеціалізовані – з інтерфейсами RS232, MicroLAN тощо).

4.2 Сумісність інтерфейсів

Цілком зрозуміло, що заміна мільйонів установлених електромеханічних приладів обліку електронними є тривалим процесом, у ході якого нові системи обліку повинні будуть працювати як з телеметричними виходами індукційних лічильників, так і з цифровими інтерфейсами електронних лічильників. Вже сьогодні інтерфейси електронних лічильників різних виробників відрізняються один від одного (RS-232, RS-422, RS-485, MicroLAN, CAN та інші), а оскільки малоімовірна можливість побудови масштабних енергосистем із застосуванням лічильників тільки одного виробника, то системи обліку майбутнього повинні мати можливість роботи з різними електронними лічильниками, а також з різними інтерфейсами.

Питання фізичного перетворення одного інтерфейсу в інший може бути порівняно просто вирішуватися за рахунок використання стандартних мікроелектронних перетворювачів, наприклад, RS-232/RS-485, та інших. Більш принципове питання – різниця протоколів обміну для лічильників різних виробників. Реальні протоколи обміну цифровими інтерфейсами електронних лічильників різних виробників не стандартизовані, різні й, більш того, найчастіше приховуються виробниками з метою жорсткої прив'язки споживачів до своєї продукції та створення технічної й фінансової залежності споживача від виробника або продавця виробів. Така політика фірми обертається зрештою збитком для самого виробника: відкритість протоколів обміну є запорукою широкого використання лічильників, а їхня закритість, навпаки, гальмує застосування лічильників і звужує потенційний ринок збуту.

Створення нових автоматизованих систем обліку енергоресурсів вимагає стандартизації й відкритості протоколів обміну лічильників

цифровими інтерфейсами, що дозволить уніфікувати й об'єднати системи обліку електроенергії, газу, енергоносіїв (гарячої води та пару).

Останнім часом у техніці обліку й керування енергоносіями бурхливо розвивається напрямок системної інтеграції територіально розосереджених первинних перетворювачів – польових приладів. Вони створюються на базі окремих фірмових стандартизованих протоколів типу M-bus, Modbus, Profibus з подальшим поступовим переходом від них до єдиної польової шини Fieldbus (зокрема, до її міжнародного відкритого й жорсткого стандарту Foundation Fieldbus). Ця шина спрямована на створення повністю цифрового комунікаційного протоколу з передачею інформації в обох напрямках між польовими пристроями та системами керування (обліку) і з підтримкою взаємозамінності приладів від різних світових виробників. Слід особливо зазначити, що польова архітектура – "інтелектуальні" польові прилади, цифрова комунікація й розподілене керування (облік) – приходять на зміну централізованому пультовому керуванню, стираючи межі між системою керування та польовим устаткуванням.

4.3 Застосування кодування в системах обліку

Завадостійке кодування дозволяє підвищити вірність передавання повідомлень, або при заданій вірності підвищити енергетичну ефективність системи передачі інформації (СПІ). Це обумовило широке використання кодів у сучасних СПІ.

Джерело повідомлень виробляє будь-які повідомлення, але після кодеру джерела, у більшості СПІ, ці повідомлення мають вигляд безперервного двійкового повідомлення. Прийнято вважати, що символи в послідовності на виході кодера джерела мають випадковий характер та не залежать один від одного.

Основна задача СПІ – передавання інформації з фіксованими вірністю та швидкістю. Ці вимоги суперечні, і підвищення швидкості призводить до зниження завадостійкості передачі. Проте, згідно з теоремами кодування Шеннона можлива безпомилкова передача інформації, якщо продуктивність джерела не перевищує пропускну здатність каналу. Досягається це використанням досить довгих корегуючих кодів. У реальних умовах довжина кодів обмежена допустимою складністю приладів кодування та декодування. Задача відшукування кодів складається в забезпеченні необхідної вірності передачі при кінцевій довжині і припустимій надлишковості.

Нещодавно була запропонована нова схема паралельного кодування, яка отримала назву турбо-кодування. Основна ідея цієї схеми складається у подвійному кодуванні інформаційної послідовності, при використанні двох кодерів. Один з них формує перевірочну послідовність за послідовністю даних у тій черзі, в якій дані поступають до входу кодера, другий працює з перемішаною послідовністю. Турбо-кодер – звичайно це систематичний кодер, то ж інформаційна послідовність на виході турбо-кодеру змін не зазнає.

Багатокаскадне використання кодерів та перемішувачів дає в результаті зверхдовгий код, котрий досить просто декодувати.

Декодування відбувається таким чином: перший декодер використовує м'яку інформацію про символи, які прийшли з каналу і, ґрунтуючись на них, виробляє жорстке рішення про переданий символ. Також на виході декодера формується скореговане м'яке рішення відносно переданого символу, яке використовується в ролі м'якого входу в наступних каскадах. М'які рішення формуються також і по перемішаній послідовності, що дає можливість боротьби з пакетами помилок.

Особливість цього методу кодування міститься в тому, що подальші каскади мають можливість оперувати з м'яким рішенням відносно

прийнятих символів, що потенційно може призвести до більш повного виправлення помилок.

До сьогодні розроблено багато різних завадостійких кодів, що відрізняються один від одного основою, відстанню, надмірністю, структурою, функціональним призначенням, енергетичною ефективністю, кореляційними властивостями, алгоритмами кодування й декодування, формою частотного спектра.

Найбільш важливий підклас безперервних кодів утворюють згорткові коди, що відрізняються від інших безперервних кодів методом побудови й широкою сферою застосування.

Загалом, що довший код при фіксованій надмірності, то більша відстань і вища завадостійкість коду. Однак довгі коди складно реалізуються. Складені коди дають компромісне вирішення задачі; з них основне значення мають каскадні коди й коди добутку. Як правило, каскадний код складається з двох щаблів (каскадів): внутрішнього й зовнішнього. По лінії зв'язку сигнали передають внутрішнім кодом, символічні слова якого є символами зовнішнього коду.

Коди добутку будують у вигляді матриці, у якій рядки є словами одного коду, а стовпчики - того ж або іншого коду.

Один з найпоширеніших методів формування коду добутку полягає в послідовному запису по k_1 символів вхідної інформаційної послідовності в k_2 рядків матриці (наприклад, у комірки оперативної пам'яті), додавання надлишкових символів по $n_1 - k_1$ у кожен рядок та по $n_2 - k_2$ у кожен стовпчик, після чого послідовність символів коду зчитують з матриці по рядках або стовпчиках. Фізичним аналогом коду добутку є, зокрема, частотно-часовий код, рядки якого розташовуються уздовж осі часу, а стовпчики - уздовж осі частот.

Похідні коди будують на основі деякого вихідного коду, до якого або додають символи, збільшуючи відстань (розширений код), або скорочують частину інформаційних символів без зміни відстані (скорочений код), або викидають (виключують) деякі символи (виколотий, або перфорований код). Код

Хемінга наводить приклад процедури розширення, що збільшує відстань коду від 3 до 4. Необхідність у виколюванні виникає в результаті побудови на основі вихідного коду іншого, менш потужного, проте коротшого коду з тією ж відстанню.

При ширшому трактуванні терміна "похідний код" до цього класу можна віднести всі коди, отримані з вихідного додаванням або відніманням як символів, так і слів.

Формальний поділ кодів на бінарні і небінарні має штучний характер; за аналогією варто виділяти трійкові, четвіркові та інші коди більшої основи. Виправдовується такий поділ ускладненням алгоритмів побудови, кодування та декодування небінарних кодів.

Іноді бажано, щоб інформаційні та надлишкові символи розташовувалися окремо. У систематичних кодах ця умова виконується. У циклічних кодах кожне слово містить всі свої циклічні перестановки. Всі n циклічних перестановок (слова довжини n) утворюють цикл. У квазіциклічних кодах цикл утвориться на числі символів $n-1$ або, рідше, $n-2$. Циклічні коди важливі як з точки зору математичного опису, так і для побудови й реалізації коду.

Помилки в каналах зв'язку мають різний розподіл, однак для вибору завадостійкого коду доцільно розділити всі можливі конфігурації помилок на незалежні (некорельовані) і пакети (корельовані помилки). На практиці доводиться враховувати якість інтервалів між пакетами: вони можуть бути вільними від помилок або ж містити випадкові незалежні помилки.

Під кореляційними маємо на увазі коди, що мають хороші кореляційні властивості, важливі при передачі сигналів входження у зв'язок, для підвищення захищеності від деяких видів завад, добування сигналів з інтенсивних шумів, забезпечення багатостанційного доступу, побудови асинхронно-адресних систем зв'язку. Кореляційні коди містять у собі пари протилежних сигналів з хорошою функцією автокореляції (метод внутрішньоімпульсної модуляції), імпульсно-інтервальні коди, що мають на фіксованому інтервалі часу постійну для всіх слів

коду кількість імпульсів, які не перекриваються (при будь-якому взаємному зрушенні слів у часі) значеннями інтервалів між імпульсами, ансамблі сигналів з хорошими взаємнокореляційними властивостями.

Особливий клас утворюють частотно-компактні коди, призначені для зосередження енергії сигналу в ймовірно вужчій смузі частот. Загальна постановка задачі розуміється в різних системах зв'язку по-різному: у провідних лініях і лінійних трактах, які містять смуго-обмежуючі фільтри із крутими фронтами, необхідно основну енергію сигналу "відсунути" від крайніх частот до центру смуги пропускання з метою зменшення між символних спотворень; у мережах радіозв'язку із жорсткими обмеженнями по електромагнітній сумісності радіозасобів від коду потрібно значно (на десятки децибелів) зменшити рівень позасмугових випромінювань. Структура кодування й декодування частотно-компактних кодів істотно залежать від методу модуляції.

Далі розглядаються два типи кодів: блокові й деревоподібні. Визначальні відмінності між кодерами для кодів цих двох типів складається в наявності або відсутності пам'яті. Кодер для блокового коду є пристроєм без пам'яті, що відображає послідовності з k вхідних символів у послідовності з n вихідних символів. Термін "без пам'яті" вказує, що кожен блок з n символів залежить тільки від відповідного блоку з k символів і не залежить від інших блоків. Це не означає, що кодер не містить елементів пам'яті. Важливими параметрами блокового коду є n , k , $R = k/n$ та d_{min} . На практиці значення k лежать між 3 і декількома сотнями, а R звичайно $1/4 \dots 7/8$. Значення, що лежать поза цими межами, є можливими, але часто призводять до деяких практичних труднощів. Вхідні й вихідні послідовності звичайно складаються із двійкових символів, але іноді можуть складатися з елементів деякого алфавіту більшого об'єму. Кодер для деревоподібного коду є пристроєм з пам'яттю, у яке надходять набори з m двійкових вхідних символів, а на виході з'являються набори з n двійкових вихідних символів. Кожен набір n вихідних символів залежить від поточного вхідного набору й від v попередніх вхідних символів. Таким чином, пам'ять кодера має містити $v + m$ вхідних

символів. Параметр $v+m$ часто називають довжиною кодового обмеження даного коду й позначають $k = v + m$ (не слід плутати з параметром k для блокового коду). Зазначимо, що позначення часто не узгоджуються між собою. Деякі автори називають довжиною кодового обмеження параметр k , у той час як інші - параметр v . Тут довжиною кодового обмеження будемо називати величину v , оскільки це призводить до меншої плутанини для кодів з $m > 1$. Параметр $k = v + m$ майже не буде використовуватися. Деревоподібні коди характеризуються також швидкістю $R = m/n$ і вільною відстанню d_{cv} . Точне визначення d_{cv} більш громіздке, ніж визначення d_{min} для блокових кодів, однак параметр d_{cv} , власне кажучи, містить ту ж інформацію про код, що й d_{min} . Типові значення параметрів деревоподібних кодів такі: $m, n = (1...8)$, $R = (1/4... 7/8)$, $v = (2...60)$.

При іншому підході коди можна розділити на лінійні й нелінійні. Лінійні коди утворюють векторний простір і мають наступну важливу властивість: два кодових слова можна скласти, використовуючи відповідне визначення суми, і одержати третє кодове слово. У випадку звичайних двійкових кодів ця операція є посимвольним додаванням двох кодових слів по модулі 2 (тобто $1 + 1 = 0$, $1 + 0 = 1$, $0 + 0 = 0$). Ця властивість призводить до двох важливих наслідків. Перший з них полягає в тому, що лінійність істотно спрощує процедури кодування й декодування, дозволяючи виразити кожне кодове слово у вигляді "лінійної" комбінації невеликої кількості виділених кодових слів, так званих базисних векторів. Друга властивість полягає в тому, що лінійність істотно спрощує задачу обчислення параметрів коду, оскільки відстань між двома кодовими словами при цьому еквівалентна відстані між кодовим словом, що складається цілком з нулів, і деяким іншим кодовим словом. Таким чином, при обчисленні параметрів лінійного коду досить розглянути, що відбувається при передачі кодового слова, яка складається повністю з нулів. Обчислення параметрів спрощується ще й тому, що відстань Хемінга між даним кодовим словом і нульовим кодовим словом дорівнює числу ненульових елементів даного кодового слова. Це число часто називають вагою Хемінга даного слова, і список, що містить число кодових слів

кожної ваги, можна використати для обчислення характеристик коду за допомогою адитивної межі. Такий список називають спектром коду.

Лінійні коди відрізняються від нелінійних замкнутістю кодової множини щодо деякого лінійного оператора, наприклад додавання або множення слів коду, розглянутих як вектори простору, що складається з кодових слів - векторів. Лінійність коду спрощує його побудову й реалізацію. При великій довжині практично можуть бути використані тільки лінійні коди. Разом з тим часто нелінійні коди мають кращі параметри в порівнянні з лінійними. Для відносно коротких кодів складність побудови й реалізації лінійних і нелінійних кодів приблизно однакова.

Як лінійні, так і нелінійні коди утворюють великі класи, що містять багато різних конкретних видів завадостійких кодів. Серед лінійних блокових найбільше значення мають коди з однією перевіркою на парність, М-коди (симплексні), ортогональні, біортогональні, Хемінга, Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, Голея, квадратично-від'ємні (КВ), Рида-Соломона. До нелінійних відносять коди з контрольною сумою, інверсні, Нордстрома-Робінсона (НР), з постійною вагою, перестановочні з повторенням і без повторення символів (повні коди ортогональних таблиць, проєктивних груп, груп Матьє та інших груп перестановок).

Більшість схем кодування, що застосовуються на практиці, базуються на лінійних кодах. Подвійні лінійні блокові коди часто називають груповими кодами, оскільки кодові слова утворюють математичну структуру, яку називають групою. Лінійні деревоподібні коди зазвичай називають згортковими кодами, оскільки операцію кодування можна розглядати як дискретну згортку вхідної послідовності з імпульсним відгуком кодера.

Нарешті, коди можна розбити на коди, що виправляють випадкові помилки, і коди, що виправляють пакети помилок. Для виправлення пакетів помилок було створено багато кодів, що мають хороші параметри. Однак при наявності пакета помилок часто виявляється більш вигідним використати коди,

що виправляють випадкові помилки, разом із пристроєм перемішування та відновлення. Такий підхід містить у собі процедуру перемішування порядку символів у закодованій послідовності перед передачею та відновленням вихідного порядку символів після прийому для того, щоб рандомізувати помилки, об'єднані в пакети.

Код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгхема (БЧХ коди) - у теорії кодування це широкий клас циклічних кодів, що застосовуються для захисту інформації від помилок. Відрізняється можливістю побудови коду із заздалегідь визначеними коригувальними властивостями, а саме, мінімальною кодовою відстанню.

БЧХ-код є циклічним кодом, який можна задати породжуючим поліномом. Для його знаходження у випадку БЧХ-коду необхідно заздалегідь визначити довжину коду n (вона не може бути довільною) і необхідну мінімальну відстань $d \leq n$.

4.4 Деякі практично застосовані коди, що виправляють помилки

4.4.1 Код Хемінга. Ідея кодів Хемінга в наступному: всі біти, номери яких є ступінь 2 — контрольні, інші — біти повідомлення. Кожен контрольний біт відповідає за парність суми деякої групи біт. Той самий біт може ставитися до різних груп. Щоб визначити які контрольні біти контролюють біт у позиції k треба розкласти k за ступенями двійки: якщо $k = 11 = 8 + 2 + 1$, то цей біт належить до трьох груп — до групи, чия парність підраховується першим бітом, до групи 2-ого й до групи 8-ого бітів. Іншими словами, в контрольний біт з номером 2^k заноситься сума (по модулю 2) бітів з номерами, які мають у розкладанні за ступенями двійки ступінь 2^k :

$$\begin{aligned}
b_1 &= b_3 + b_5 + b_7 + \dots \\
b_2 &= b_3 + b_6 + b_7 + b_{10} + b_{11} + b_{14} + b_{15} \dots \\
b_4 &= b_5 + b_6 + b_7 + b_{12} + b_{13} + b_{14} + b_{15} \dots \\
b_8 &= b_9 + b_{10} + b_{11} + b_{12} + b_{13} + b_{14} + b_{15} \dots
\end{aligned}$$

Отримавши слово, одержувач перевіряє кожен контрольний біт на предмет правильності парності й складаючи номери контрольних бітів, в яких порушена парність. Отримане число є *XOR* номерів бітів, де відбулася помилка. Якщо помилка одна, то це число є просто номер помилкового біта.

Наприклад, якщо в контрольних розрядах 1, 2 та 8 виявлена розбіжність парності, то помилка в 11 розряді, тому що тільки він пов'язаний одночасно із цими трьома контрольними розрядами.

Код Хеммига може виправляти тільки поодинокі помилки. Однак, є прийом, що дозволяє розповсюдити цей код на випадок групових помилок. Нехай нам потрібно передати k слів. Розташуємо їх у вигляді матриці одне слово — один рядок. Звичайно передають слово за словом. Але ми вчинемо інакше, передамо слово довжини k з перших розрядів всіх слів, потім — других, і т.д. При прийманні всіх слів матриця відновлюється. Якщо ми хочемо виявляти групові помилки розміру k , то в кожному рядку відновленої матриці буде не більше однієї помилки. А з одиночними помилками код Хемінга впорається.

4.4.2 Код Ріда-Соломона. Коди Ріда-Соломона - недвійкові циклічні коди, що дозволяють виправляти помилки в блоках даних. Елементами кодового вектора є не біти, а групи бітів (блоки). Дуже поширені коди Ріда-Соломона, що працюють із байтами (октетами). Код Ріда-Соломона є важливим конкретним випадком БЧХ-кода (Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема). Ефективний алгоритм декодування був запропонований в 1969 р. Елвіном Берлекемпом і Джеймсом Мессі.

Зараз ці коди широко використовуються в системах відновлення даних з компакт-дисків, при створенні архівів з інформацією для відновлення у випадку пошкоджень, у завадостійкому кодуванні.

Код Ріда-Соломона над $GF(q^m)$, що виправляє t помилок, вимагає $2t$ перевірочних символів і за його допомогою виправляються довільні пакети довжиною t та менші. Відповідно до теореми про межу Рейгера (кожен лінійний блоковий код, що виправляє всі пакети довжиною t та меншою, повинен містити щонайменше $2t$ перевірочних символів), коди Ріда-Соломона є оптимальними з погляду співвідношення довжини пакета й можливості виправлення помилок - використовуючи $2t$ додаткових перевірочних символів виправляються t помилок (і менше).

Код Ріда-Соломона є одним з найбільш потужних кодів, що виправляють багаторазові пакети помилок. Застосовується в каналах, де пакети помилок можуть утворюватися настільки часто, коли їх уже не можна виправляти за допомогою кодів, що виправляють одиничні помилки.

$(q^m - 1, q^m - 1 - 2t)$ -код Ріда-Соломона над полем $GF(q^m)$ з кодовою відстанню $d = 2t + 1$ можна розглядати як $((q^m - 1) m, (q^m - 1 - 2t)m)$ -код над полем $GF(q^m)$, що може виправляти будь-яку комбінацію помилок, зосереджену в t або меншому числі блоків з m символів. Найбільше число блоків довжини m , які може зачепити пакет довжини l_i , де $l_i \leq mt_i - (m - 1)$, не перевершує t_i , тому код, що може виправити t блоків помилок, завжди може виправити й будь-яку комбінацію з p пакетів загальної довжини l , якщо $l + (m - 1) \leq mt$.

16-річний $(15, 11)$ код Ріда-Соломона ($t = 2, \ell_0 = 1$)

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2)(x - \alpha^3)(x - \alpha^4) = x^4 + \alpha^{13}x^3 + \alpha^6x^2 + \alpha^3x + \alpha^{10}$$

Ступінь $g(x)$ дорівнює 4, $n - k = 4$ й $k = 11$. Кожному елементу поля $GF(16)$ можна зіставити 4 біти. Інформаційний багаточлен є послідовністю 11 символів з $GF(16)$, що еквівалентно 44 бітам, а все кодове слово є набором з 60 біт.

8-річний $(7, 3)$ код Ріда-Соломона ($t = 2, \ell_0 = 4$)

$$g(x) = (x - \alpha^4)(x - \alpha^5)(x - \alpha^6)(x - \alpha^0) = x^4 + \alpha^6x^3 + \alpha^6x^2 + \alpha^3x + \alpha$$

Для інформаційного багаточлена виду

$$m(x) = \alpha^4 x^2 + x + \alpha^3$$

кодове слово несистематичного коду запишеться у вигляді:

$$c(x) = m(x)g(x) = (\alpha^4 x^2 + x + \alpha^3)(x^4 + \alpha^6 x^3 + \alpha^6 x^2 + \alpha^3 x + \alpha) = \alpha^4 x^6 + \alpha x^5 + \alpha^6 x^4 + 0x^3 + 0x^2 + \alpha^5 x + \alpha^4$$

що являє собою послідовність сімох восьмеричних символів.

Практично кодування за допомогою коду Ріда-Соломона може бути реалізоване двома способами: систематичним і несистематичним.

При несистематичному кодуванні інформаційне слово множиться на полином у полі Галуа. Отримане закодоване слово повністю відрізняється від вихідного й для добування інформаційного слова потрібно виконати операцію декодування, а вже потім можна перевірити дані на вміст помилок. Таке кодування вимагає більших затрат ресурсів тільки на добування інформаційних даних, при цьому вони можуть бути без помилок.

При систематичному кодуванні до інформаційного блоку з k символів приписуються $2t$ перевірочних символів, при обчисленні кожного перевірочного символу використовуються всі k символів вихідного блоку. У цьому випадку немає затрат ресурсів при добуванні вихідного блоку, якщо інформаційне слово не містить помилок, але кодувальник/декодувальник має виконати $k(n - k)$ операцій додавання й множення для генерації перевірочних символів. Оскільки всі операції провадяться в полі Галуа, то самі операції кодування/декодування вимагають багато ресурсів і часу. Швидкий алгоритм декодування базується на швидкому перетворенні Фур'є, та виконується за час порядку $\ln n^2$.

Код Ріда-Соломона використовується в контролерах оперативної пам'яті, при архівуванні даних, запису інформації на жорсткі диски (ЕСС), запису на CD/DVD диски. Навіть якщо пошкоджено значний обсяг інформації, зіпсовано

кілька секторів дискового носія, то коди Ріда- Соломона дозволяють відновити більшу частину загубленої інформації. Також використовується при записі на такі носії, як магнітні стрічки й штрихкоди.

Можливі помилки при читанні з диска з'являються вже на етапі виробництва диска, тому що зробити ідеальний диск при сучасних технологіях неможливо. Так само помилки можуть бути викликані подряпинами на поверхні диска, пилом тощо. Тому при виготовленні компакт-диску використовується система корекції CIRC (Cross Interleaved Reed Solomon Code). Ця корекція реалізована у всіх пристроях, що дозволяють зчитувати дані з CD дисків, у вигляді чипа із прошивкою firmware. Виявлення й корекція помилок ґрунтується на надмірності й перемішуванні (redundancy & interleaving). Надмірність складає приблизно 25% від вихідної інформації.

При запису на цифрові аудіо компакт-диски (Compact Disc Digital Audio - CD-DA) використовується стандарт Red Book. Корекція помилок відбувається на двох рівнях: C1 та C2. При кодуванні на першому етапі відбувається додавання перевірочних символів до вихідних даних, на другому етапі інформація знову кодується. Крім кодування здійснюється також перемішування байтів, щоб при корекції блоки помилок розпалися на окремі біти, які легше виправляються. На першому рівні виявляються та виправляються помилкові блоки довжиною один і два байти (один і два помилкових символи відповідно). Помилкові блоки довжиною три байти виявляються й передаються на наступний рівень. На другому рівні виявляються й виправляються помилкові блоки, що виникли в C2, довжиною 1 й 2 байти. Виявлення трьох помилкових символів є фатальною помилкою, і не може виправитися.

Цей алгоритм кодування використовується також при передачі даних по мережах WiMAX, в оптичних, супутникових і радіорелейній лініях зв'язку. Метод прямої корекції помилок у потоці трафіку (Forward Error Correction, FEC) ґрунтується на кодах Ріда-Соломона.

4.4.3 Каскадне кодування. Каскадне кодування поєднує переваги різних способів кодування. Широко використовуваною є наступна конструкція: дані кодуються кодом Ріда-Соломона, потім *перемішуються* (при цьому символи, розташовані близько, містяться далеко один від одного) і кодуються згортковим кодом. На приймачі спочатку декодується згортковий код, потім здійснюється зворотнє перемішування (при цьому *пачки помилок* на виході згорткового декодера потрапляють у різні кодові слова коду Ріда-Соломона), і потім здійснюється декодування коду Ріда-Соломона.

4.4.4 Циклічна контрольна сума як компонент каскадного кодування. Коди CRC (cyclic redundancy check — циклічна надлишкова перевірка, або циклічна контрольна сума) є *систематичними* кодами, призначеними не для виправлення помилок, а для їхнього виявлення.

Хоча *циклічна контрольна сума не є завадостійким кодом*, але вона часто використовується разом з іншими кодами (особливо з систематичними кодами, в яких надлишкова інформація зберігається окремо від корисної) з метою швидкої перевірки на наявність помилок, якщо вірогідність виникнення помилки в системі достатньо мала. Тоді при відсутності помилок, на які вказувала б CRC, подальша перевірка “основним” завадостійким кодом не проводиться.

Алгоритм CRC базується на властивостях ділення з залишком двійкових багаточленів, тобто хеш-функція є по суті залишком від ділення багаточлена, що відповідає вхідним даним, на якийсь фіксований *багаточлен*, що породжує (примітивний поліном).

Кожному кінцевому двійковому набору даних a_0, a_1, \dots, a_N взаємооднозначно зіставляється двійковий багаточлен

$$\sum_{0 \leq n \leq N} a_n x^n$$

послідовність коефіцієнтів якого являє собою вихідну послідовність. Наприклад, десяткове число 90 (1011010 у двійковому записі) відповідає багаточлену:

$$P(x) = 1 \cdot x^6 + 0 \cdot x^5 + 1 \cdot x^4 + 1 \cdot x^3 + 0 \cdot x^2 + 1 \cdot x^1 + 0 \cdot x^0 = x^6 + x^4 + x^3 + x^1$$

Подібним же чином у вигляді двійкового багаточлена може бути представлений кожен із блоків оброблюваних даних, і будь-який двійковий багаточлен згортається в набір бітів. Незавжди побачити, що кількість різних багаточленів ступеня менше N дорівнює 2^N , що збігається із числом всіх двійкових послідовностей довжини N .

При діленні з остачею ступінь багаточлена залишку менше від ступеня багаточлена дільника, тобто якщо як дільник вибрати багаточлен ступеня N , то для різних залишків від ділення він буде давати саме 2^N .

При «правильному» виборі багаточлена, що породжує (дільника), залишки від ділення на нього будуть мати потрібні властивості хешування - добре перемішуватися й швидким алгоритмом обчислення. Друге забезпечується тим, що ступінь багаточлена, що породжує, звичайно пропорційна довжині байта або машинного слова (наприклад 8, 16 або 32).

Операція ділення на примітивний поліном еквівалентна наступній схемі: нехай обраний примітивний поліном, що задає цикл де Брейна 0010111001011100... і блок даних 0111110, побудована таблиця, верхній рядок заповнений блоком даних, а нижні рядки - зсуву на 0,1,2 біт циклу де Брейна

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Тоді контрольна сума буде дорівнювати операції строгої диз'юнкції тих стовпчиків, над якими у верхньому рядку розташований 1. У цьому випадку,

$$010 \text{ xor } 101 \text{ xor } 011 \text{ xor } 111 \text{ xor } 110 = 101 \text{ (CRC)}$$

Таким чином, контрольна сума CRC з багаточленом, що породжує, ступеню N є бітовою послідовністю довжини N , що являє багаточлен, який виявився в залишку при діленні вхідного багаточлена на багаточлен, що породжує:

$$R(x) = P(x) \cdot x^r \text{ mod } G(x)$$

де:

$R(x)$ — контрольний код багаточлена $P(x)$,

$P(x)$ — вихідний багаточлен,

$G(x)$ — багаточлен, що продукує,

$r = \text{deg } G(x)$ — ступінь багаточлена, що продукує.

Множення x^r здійснюється приписуванням r нулів до вхідної послідовності, що поліпшує якість хешування для коротких вхідних послідовностей.

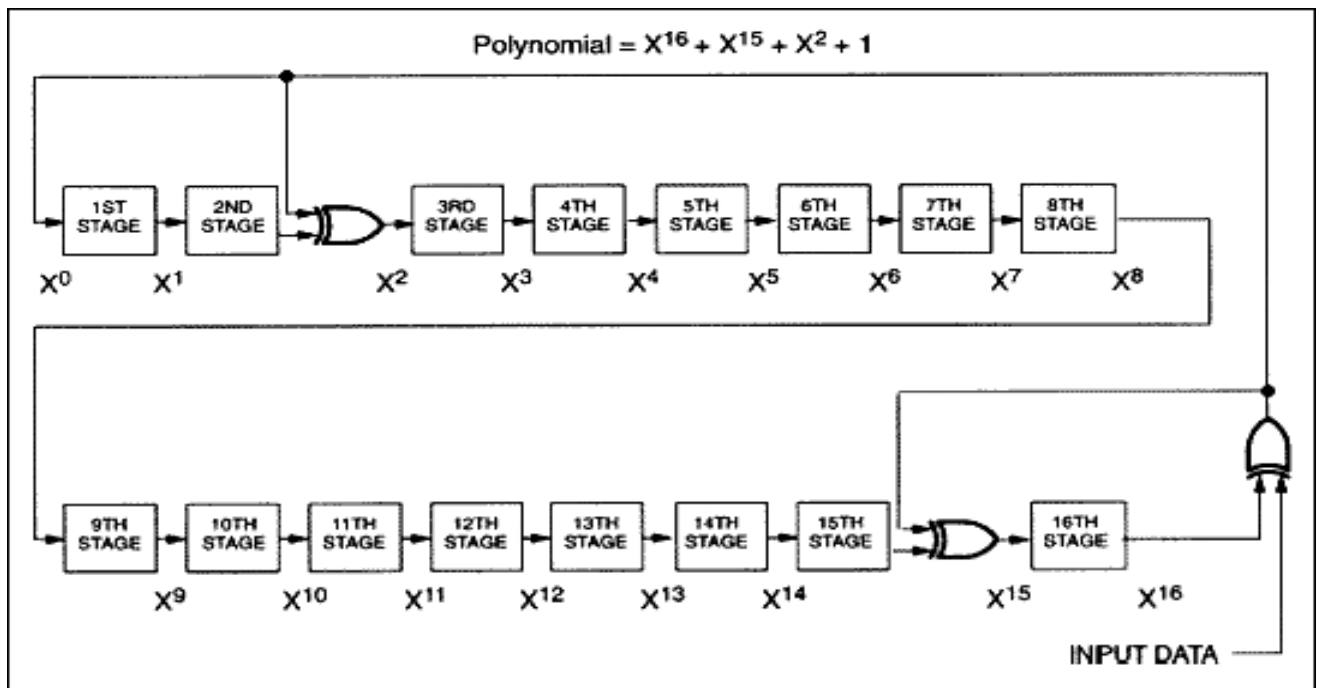


Рисунок 4.2 - Блок-схема алгоритму обчислення CRC-16

Від вибору полінома залежить ймовірність виявлення помилок. Вибір «якісного» полінома досить складний. На практиці зазвичай використовуються всього кілька стандартних поліномів, приклади яких наведені в таблиці 4.1.

На відміну від простої контрольної суми, де спотворення одного біта вихідних даних може призводити до зміни одного біта контрольної суми, циклічна контрольна сума змінюється при цьому істотно, що забезпечує набагато вищий ступінь виявлення помилок.

Таблиця 4.1 - Приклади найбільш популярних поліномів

назва коду	ступінь	поліном
CRC-16	16	$X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$
CRC-CCIT	16	$X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$
CRC-32	32	$X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$

Практичне застосування знаходять як апаратна реалізація модулів обчислення CRC (напр., у контролерах накопичувачів на жорстких дисках, контролерах мережі Ethernet), так і програмна. Програмна реалізація CRC з невеликою розрядністю (8 або 16) часто для збільшення швидкодії реалізується табличними методами.

Циклічна контрольна сума застосовується в більшості сучасних протоколів передачі даних (напр., у протоколі ModBus RTU використовується CRC-16), а також у пристроях зберігання даних (в основному CRC-32). Наприклад, в системі “АРВІД” (система запису цифрових даних на магнітну стрічку з використанням відеомагнітофонів стандарту VHS або V8, швидкість передачі корисних даних близько 325кБайт/сек) використовується каскадне кодування кодами Хемінга, та додатковий захист блоку за допомогою CRC-32, що дозволяє знизити вимоги до обчислювальної потужності, бо відновлення даних відбувається тільки для пошкоджених блоків.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОСТІ РОБОТИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ КОДУВАННЯ ХЕМІНГА

В сучасних системах обліку, в тому числі, системах обліку енергоресурсів, в якості довготривалої пам’яті найчастіше використовується пам’ять з електричним записом та стиранням. Найпоширеніший та найбільш економічно вигідний тип такої пам’яті – це так звана Flash-пам’ять, особливостями якої є

блочна (“сторінкова”) внутрішня організація. Запис інформації в таку пам’ять відбувається через проміжний буфер (ОЗП), розмір якого дорівнює розміру сторінки. Зміна стану комірок пам’яті цього типу при запису можлива тільки в один бік: з лог.1 до лог.0. Зворотній процес називається стиранням, і можливий тільки для всієї сторінки одночасно. Розмір сторінки в більшості сучасних мікросхем Flash-пам’яті становить 512 або 528 байт (4096 або 4224 біт).

Іншою особливістю цього типу пам’яті є обмежена кількість стирань, і хоча вона для сучасної Flash-пам’яті складає в середньому близько 10^5 за нормальних умов (не менше 10^4), іноді цього недостатньо. Відмова комірок пам’яті зазвичай починається поступово, та виявляється в неможливості утримування коміркою одного з логічних станів. Після виявлення пошкодженої сторінки вона може бути помічена відповідним чином і не використовуватись в подальшому, але наявна інформація в ній вже буде спотворена. Таким чином, є потреба в корекції поодиноких помилок в блоках розміром близько 4 кбіт, та висока достовірність контролю чисельних помилок.

Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати код Хемінга, а також контроль цілісності блоку за допомогою CRC-32.

Для побудови коду Хемінга має виконуватись умова:

$$2^k \geq k + m + 1 \quad (5.1)$$

де k – кількість контрольних бітів,

m – кількість інформаційних бітів.

Підставляючи в якості $k + m$ розмір сторінки з урахуванням наявності CRC-32 ($4096 - 32 = 4064$ біт), визначимо необхідну кількість контрольних бітів, яка в нашому випадку складе 12 біт. Кількість корисних даних в сторінці становитиме $4064 - 12 = 4052$ біт, що складає 506,5 байт. Враховуючи певні незручності в роботі з даними, які складають менше 1 байта, обмежимо кількість корисних даних 506 байтами (вирівнювання по межі байта).

Оскільки розташування контрольних бітів не має жодного значення, для зручності роботи з корисними даними розташуємо контрольні біти після бітів даних, окремо від них. Алгоритм кодування буде мати вигляд, показаний на рисунку 5.1.

Програмна реалізація цього алгоритму дещо ускладнюється через те, що в більшості процесорів та мікроконтролерів мінімальна ширина даних, що дозволяють використовувати індексну адресацію, дорівнює байту.

Приклад програмної реалізації для мови програмування C наведено в лістингу 5.1

Лістинг 5.1.

```
BYTE buf[506];           // масив з корисними даними
.....
{
    int i, j, k;
    int n = 1;
    WORD px = 0;         // контрольні біти
    for (i = 0; i < 506; i++)
    {
        BYTE x = buf[i]; // тимчасова змінна для
бітових операцій
        for (j = 0; j < 8; j++) // цикл бітових операцій
        {
            if (x & 1)
            {
                WORD mask = 1;
                for (k = 0; k < 12; k++)
                {
                    if (n & mask)
                        px ^= mask;
                }
            }
            x >>= 1;
            n++;
        }
    }
}
```

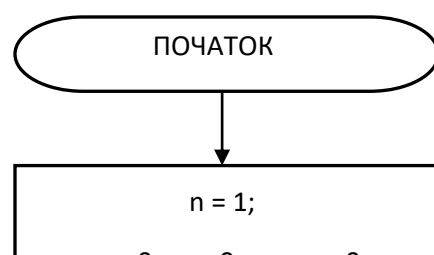


Рисунок 5.1 - Блок-схема алгоритму кодування за Хемінгом

Як бачимо, необхідність виконувати операції над кожним бітом при відсутності індексної адресації бітів вимагає застосування окремого циклу для здійснення цих операцій. Результат симуляції алгоритму за допомогою Keil μ Vision V3.51 для мікроконтролера C8051F120 (ядро MCS-51) фірми Silabs, та для мікроконтролера STR911FM44 (ядро ARM9) фірми ST microelectronic наведені в табл.5.1.

Для спрощення реалізації алгоритму кодування та підвищення швидкості його роботи пропонується розбити дані на 8 частин, отримавши для кожної з них свій набір контрольних бітів. Особливість такого підходу полягає в тому, що дані будемо розбивати таким чином, що перший блок буде створено з бітів D0 усіх байтів, другий – з бітів D1 усіх байтів, і т.д. Найсуттєвішою перевагою такого розбивання буде те, що операції підрахунку коду Хемінга будуть відбуватись одночасно для всіх 8 блоків.

Оскільки розмір блоку буде зменшено до $4064 / 8 = 508$ біт, кількість контрольних бітів у кожному блоці можна зменшити до 9. Кількість бітів даних становитиме $508 - 9 = 499$ біт у кожному блоці. Приклад програмної реалізації мовою програмування C наведено в лістингу 5.2.

Лістинг 5.2.

```
BYTE buf[499];           // масив з корисними даними
BYTE pbuf[9];           // масив контрольних даних
.....
{
    int i, k;
    int n = 1;
    for (k = 0; k < 9; k++)           // початкова
ініціалізація
        pbuf[k] = 0;           // контрольних даних

    for (i = 0; i < 499; i++)
    {
        WORD mask = 1;
        for (k = 0; k < 9; k++)
        {
            if (n & mask)
                pbuf[k] ^= buf[i];
        }
        n++;
    }
}
```

Результат симуляції алгоритму за допомогою Keil μ Vision V3.51 для мікроконтролера C8051F120 (ядро MCS-51) фірми Silabs, та для мікроконтролера STR911FM44 (ядро ARM9) фірми ST microelectronics наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 - Результати симуляції програм в різних вихідних умовах

Мікроконтролер	C8051F120	C8051F120	C8051F120	STR911 FM44	STR911 FM44	STR911 FM44
Ядро *	MCS-51	MCS-51	MCS-51	ARM9	ARM9	ARM9
Розрядність МК	8 біт	8 біт	8 біт	32 біт	32 біт	32 біт
Лістинг програми	4.1	4.2	4.3	4.1	4.2	4.3
Кількість даних в одному циклі обробки, біт	1	8	32	1	8	32
Довжина блоку даних, біт	4 048	499	119	4 048	499	119
Загальний об'єм корисних даних, біт	4 048	3 992	3 808	4 048	3 992	3 808
Коефіцієнт корисного використання сторінки пам'яті	98,83 %	97,46 %	92,97 %	98,83 %	97,46 %	92,97 %
Кількість контрольних даних одного блоку, біт	12	9	7	12	9	7
Загальний об'єм контрольних даних, біт	12	72	224	12	72	224
Кількість тактів	863 071	244 721	108 147	165 984	46 736	11 192
Збільшення швидкості порівняно з 1-бітовим алгоритмом	–	3,53	7,98	–	3,55	14,83

У всіх випадках було встановлено максимальний рівень оптимізації. Для мікроконтролера з ядром ARM9 було встановлено 32-бітний режим коду (ARM-mode). Для мікроконтролера з ядром MCS-51 масиви даних було розміщено в сегменті xdata.

Оскільки для обох перевірених мікроконтролерів приріст швидкості вийшов досить великим, було прийняте рішення повторити тест з розбиванням даних на 32 блоки. У цьому випадку довжина блоку корисних даних склала 119 біт, а кількість контрольних біт для блока була скорочена до 7. Загальний об'єм корисних даних склав:

$$119 \times 32 = 3808 \text{ біт}$$

Реалізацію мовою програмування C наведено в лістингу 5.3. Результати симуляції додано в табл.5.1.

Лістинг 5.3.

```
DWORD buf[119];           // масив з корисними даними
DWORD pbuf[7];           // масив контрольних даних
.....
{
    int i, k;
    int n = 1;
    for (k = 0; k < 7; k++)           // початкова
ініціалізація
        pbuf[k] = 0;           // контрольних даних

    for (i = 0; i < 119; i++)
    {
        WORD mask = 1;
        for (k = 0; k < 7; k++)
        {
            if (n & mask)
                pbuf[k] ^= buf[i];
        }
        n++;
    }
}
```

Як бачимо, у випадку розбивання даних на 32 блоки і переході на 32-бітну арифметику приріст швидкості вийшов різним для різних мікроконтролерів: у випадку 32-бітного МК цей приріст фактично пропорційний збільшенню розрядності, а у випадку 8-бітного приріст суттєво менший, але все рівно достатньо великий (завдяки тому, що скорочується кількість необхідних підготовчих операцій для виконання індексної адресації).

Втрати корисного об'єму пам'яті склали близько 1,5% при розбиванні на 8 бітових блоків, та близько 6% при розбиванні на 32 блоки. Таким чином, для зберігання у flash-пам'яті з сторінками розміром 512 байт, розбивання даних на 8 бітових блоків можна вважати доцільним в будь-яких системах. Розбивання даних на більшу кількість бітових блоків є доцільним при наявності достатнього запасу об'єму flash-пам'яті.

Крім того, при розбиванні даних на бітові блоки можливості відновлення також збільшуються, оскільки при виникненні кількох помилок в різних бітах кодових слів вони опиняться в різних блоках, і кожна з них може бути виправлена окремо.

В каналі зв'язку пропонується використовувати код Хемінга з довжиною повідомлення 16 біт та 6 контрольними бітами. Розрахуємо вірогідність помилкової трансляції, якщо вірогідність помилки в каналі зв'язку складає 10^{-4} :

$$P_{TP} = \sum_{i=3}^n C^n_i \times P_0^i (1 - P_0)^{n-i}$$

для $n = m + k = 22$:

$$P_{TP} = C^3_{22} * P_0^3 * (1 - P_0)^{19} + C^4_{22} * P_0^4 * (1 - P_0)^{18} + C^5_{22} * P_0^5 * (1 - P_0)^{17}$$

Підстановка потрібних значень дає вірогідність не виправної помилки на рівні 3×10^{-7} при передачі даних каналом зв'язку HART.

6 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ГАЗУ

6.1 Опис принципової схеми вимірювального перетворювача

Вимірювальний перетворювач побудований на МК типу MSP430F149 фірми Texas Instruments. Вибір МК зумовлений вкрай низьким енергоспоживанням, що необхідно для мінімізації необхідної ємності резервної батареї. Типове споживання становить порядку 2мА на максимальній тактовій частоті й порядку 10мкА на частоті 32кГц. МК має 60кБ вбудованої FLASH-пам'яті й 2кБ оперативної пам'яті.

Алгоритм функціонування програми залежить від наявності або відсутності зовнішнього живлення. При наявності зовнішнього живлення по інтерфейсові HART прилад постійно перебуває в активному режимі. При відсутності зовнішнього живлення й роботі від внутрішньої батареї прилад більшу частину часу перебуває в режимі сну, періодично переходячи в активний режим і роблячи необхідні виміри й розрахунки.

Тактова частота МК залежить від режиму роботи: в активному режимі тактування відбувається від внутрішнього RC-генератора частотою 8МГц, у режимі сну – від генератора із зовнішнім кварцовим резонатором частотою 32768 Гц. У режимі сну МК виконує лічбу часу, і переходить в активний режим відповідно до заданого при конфігуруванні приладу параметрами.

Перетворення вимірюваного аналогового сигналу в цифровий провадиться за допомогою 24-розрядних дельта-сигма АЦП типу ADS1245 фірми Texas Instruments. У кожному вимірювальному каналі використовується свій окремий АЦП. Усього в приладі 4 вимірювальних канали: канал перепаду тиску, канал абсолютного тиску, канал температури газу й канал температури сенсорів тиску. Останній використовується для здійснення можливості корекції температурної похибки сенсорів тиску.

Вимірювання температури газу виконується за допомогою зовнішнього сенсору температури ТСМ-100 або ТСП-100, включеного за ратіометричною (пропорційною) схемою: послідовно з сенсором включено зразковий резистор (R1

R4), до якого під'єднано входи зразкового джерела АЦП DD1, а вимірювальні входи АЦП приєднані до сенсора температури. Елементи R5 R6 C3 C4 C5 та R22 R23 C15 C16 C22 утворюють ФНЧ, призначені для зменшення впливу високочастотних завад на входах АЦП.

У каналах тиску перед АЦП застосовано диференціальний підсилювач, виконаний на ОП типу AD8629 фірми Analog Devices. Ці ОП мають український зсув нуля (одиниці мкВ) і незначний вхідний струм (одиниці пА). Коефіцієнт підсилення для диференціального сигналу обраний рівним 5. Для зменшення впливу розкиду параметрів пасивних елементів у ланцюгах НЗЗ підсилювача використовуються однакові прецизійні резистори.

В активному режимі ключ на транзисторі VT1 замкнено, і через нього надходить живлення на сенсори тиску й температури, а також буферні підсилювачі. Роботою ключа керує МК. В якості ключа використовується польовий транзистор з каналом Р-типу.

Енергонезалежна пам'ять складається із двох частин: оперативної енергонезалежної пам'яті FRAM для проміжного зберігання даних, і FLASH-пам'яті архівних даних. Для проміжного зберігання даних обрана пам'ять типу FM25CL256 фірми Ramtron, в якості FLASH-пам'яті – широко розповсюджена DataFlash типу AT45DB161D з послідовним доступом і сторінками розміром 512 байт.

У приладі передбачена можливість встановлення ЖКІ для відображення поточного значення витрати, а також додаткової інформації. У якості ЖКІ може використовуватися стандартний модуль із організацією в 2 рядки по 8 символів, наприклад VC0802 фірми Volymín. У режимі роботи від батареї живлення на ЖКІ подається відповідно до заданого при конфігуруванні приладу, в активному режимі ЖКІ включений постійно. Оскільки живлення ЖКІ-модуля становить 3,3В, для одержання необхідної контрастності використовується джерело негативної напруги, одержуваної шляхом випрямлення імпульсів з виходу ШІМ

МК подвоювачем на C37 VD2 C38. Дільник R39 R42 дозволяє регулювати негативну напругу шляхом зміни шпаруватості ШІМ. У сплячому режимі ШІМ відключений.

Інтерфейс HART організований з використанням зовнішнього модему Bell-202 типу FX614. Вихідний сигнал перетвориться в струм каскадом на VT6 R53.

Живлення схеми здійснюється або від літєвої батареї GB1 типорозміру AA, встановленої на плату приладу, або від інтерфейсу HART. Батарея підключається через ключ на Р-канальному польовому транзисторі VT2, що при наявності зовнішнього живлення вимикається через резистор R43. Струм в HART-лінії підтримується постійним за допомогою дзеркала струму на VT3 VT5, струм якій задає перетворювач напруга-струм на VT4 R41. Опорною напругою служить вихідна напруга стабілізатора LP2951, від якого відбувається живлення схеми при наявності зовнішнього живлення.

Стабілітрони VD7 VD8 включені паралельно конденсаторам на виході стабілізатора напруги відповідно до вимог іскробезпеки, і обмежують максимальну напругу на ємності на рівні не вище 6В.

6.2 Розрахунок параметрів електронних компонентів витратоміра

Канал вимірювання температури газу виконаємо на базі пропорційної схеми. В цій схемі вимірювання сенсор температури приєднується до сигнальних входів АЦП, а зразковий резистор – до входів зразкової напруги АЦП, як зазначено на рисунку 6.1.



Рисунок 6.1 - Пропорційна схема вимірювання опору

Як відомо, результати вимірювання за допомогою пропорційної схеми не залежать від значення опорної напруги (U_{REF}), а тільки від співвідношення R_t/R_{REF} (за умов нульового струму витоку входів АЦП).

В якості сенсора температури використовуються “термометри опору” типу ТСМ-100 або ТСП-100, які мають опір 100 Ом за температури 0 °С. Щоб струм, який протікає через сенсор, не викликав помітного саморозогріву, максимальна розсіювана потужність не має перевищувати 1мВт. Тоді струм не має перевищувати:

$$P = I^2 \cdot R.$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{100}} = 3.16 \cdot 10^{-3} \text{ мА}$$

Для опорної напруги у 3,6В опір послідовно з'єднаних сенсора температури та зразкового резистора не має бути меншим за:

$$R_{\min} = 3,6 / 3,16 \times 10^{-3} = 1140 \text{ Ом}$$

Оберемо в якості зразкових резисторів з сумарним опором 2060 Ом, тоді за будь-якого опору сенсору температури значення максимального струму досягнуто не буде.

Для діапазону вимірювання – 60..+ 60°C та температурному коефіцієнті опору близько 0,41 Ом/°C диференційна напруга на сигнальних входах АЦП складе:

$$R_{t \min} = 100 + (0 - 60) \times 0,41 = 75,4 \text{ Ом}$$

$$R_{t \max} = 100 + (60 - 0) \times 0,41 = 124,6 \text{ Ом}$$

$$U_{t \min} = 3,6 \times 75,4 / (2060 + 100 + 100 + 75,4) = 116 \text{ мВ}$$

$$U_{t \max} = 3,6 \times 124,6 / (2060 + 100 + 100 + 124,6) = 188 \text{ мВ}$$

$$\Delta U_t = 188 - 116 = 72 \text{ мВ}$$

Найменший струм через вимірювальний ланцюг буде за найнижчої напруги живлення та найвищої температури газу і складе:

$$I_{\min} = 2,7 / (2060 + 100 + 100 + 124,6) = 1,13 \text{ мА}$$

Проведемо розрахунок ФНЧ, що запобігають впливу радіозавад на входах АЦП. Опір резисторів у фільтрах обмежено згори вхідними струмами АЦП та потрібною точністю вимірювань.

При заданій точності в $0,5^{\circ}\text{C}$ в середині діапазону максимально припустима помилка, зведена до диференційної напруги на вході АЦП, може складати:

$$U_{cm\ max}=(72 / (60 -(-60))) \times 0,5=0,3\text{мВ}$$

Такий помилці відповідає струм витoku:

$$I_{cm\ max} = 0,3 \times 10^{-3} / 100 = 3\text{мкА}$$

Для забезпечення необхідної точності на краях діапазону вимірювання, а також для урахування можливих витоків у з'єднувальному кабелі та інших несприятливих факторів вхідний струм АЦП не має перевищувати 1мкА . Обраний АЦП типу ADS1245 має вхідний струм не більше $0,5\text{мкА}$ для входів опорної напруги та не більше 10нА для сигнальних входів, що повністю задовольняє цю вимогу.

Проведемо розрахунок схеми живлення витратоміру. Для забезпечення можливості живлення витратоміру від інтерфейсу HART споживаний струм має бути не більше $25..30\text{мА}$, при цьому абсолютне значення струму не є важливим, важливо лише щоб струм був відносно сталим, коливання струму з частотою від 100Гц не мають бути більшими за $0,05\text{мА}$, в діапазоні $1..100\text{Гц}$ – не більше 1мА . Використання традиційних RC-фільтрів наразі не є можливим, оскільки потрібні великі значення ємності, що суперечить вимогам іскробезпеки приладу, який

використовується у вибухонебезпечній зоні. Тому для забезпечення сталості струму використаємо баласт у вигляді керованого джерела струму на транзисторі, яке підключене паралельно стабілізатору напруги живлення схеми, та контроль і підтримання на заданому рівні загального струму, споживаного схемою та баластом. Джерело струму побудуємо на базі дзеркала струму на біполярних транзисторах VT3 та VT5 з резисторами в емітерних колах. Якщо стабілізатор напруги приєднати до емітера VT5, загальний споживаний схемою та баластом струм буде підтримуватись сталим, а його значення буде визначатись струмом емітера VT3 та співвідношенням опору емітерних резисторів. Оскільки зразковий струм в даному випадку не є корисним, оберемо співвідношення струмів на рівні приблизно 1:10, тоді для “корисного” струму в 22мА зразковий струм має бути 2,2мА, а загальний струм складе $22+2,2=24,2\text{мА}$.

Проведемо розрахунок необхідної ємності резервної батареї. Оскільки повний розрахунок середнього споживаного струму неможливий через динамічну зміну споживання мікроконтролером, частина даних отримується експериментальним шляхом.

В “активному” режимі споживаний струм складається з струму сенсорів, споживаного струму АЦП (4 шт.), струму споживання мікроконтролера, струму споживання пам’яті та струмів витоку. В “енергозберігаючому” режимі сенсори та АЦП вимкнені, тому загальний струм споживання складається з струму споживання мікроконтролера, струму споживання пам’яті та струмів витоку. Експериментально встановлено, що для виконання робочого циклу вимірювання та розрахунку витрати для обраного МК, тактової частоти та певної реалізації алгоритму роботи потрібно близько 410 мсек. Запис в пам’ять однієї сторінки відбувається в середньому за 35мсек. Струм споживання сенсорів складе:

для сенсору температури газу: $I_{t_{\text{зовн.}}}=3,6/(2060+100+100+75,4) = 1,54\text{мА}$;

для сенсорів тиску та перепаду тиску: $I_p=I_{dp}=3,6/8000 = 0,45\text{мА}$;

струм споживання мікроконтролера складе 0,75мА;

струм споживання пам'яті під час стирання та запису сягає 15мА;

струм споживання одного АЦП складає 1,5мА;

струми витоку складають одиниці мкА і в активному режимі ними можна знехтувати.

Таким чином, середній струм споживання, проінтегрований за мінімальний робочий період 60 секунд, складе:

$$I_{\text{акт.}} = \frac{410 \cdot 10^{-3} \times (1,54 + 2 \times 0,45 + 4 \times 1,5 + 0,75) \cdot 10^{-3} + 35 \cdot 10^{-3} \times 15 \cdot 10^{-3}}{60} = 71,55 \text{ мкА}$$

В енергозберігаючому режимі МК споживає близько 12мкА, струм споживання пам'яті знаходиться на рівні струмів витоку, які загалом складають не більше 5мкА. Таким чином, загальний проінтегрований за мінімальний робочий період струм споживання складе $71,55 + 12 + 5 = 88,55$ мкА. Для забезпечення автономного функціонування витратоміру протягом 1 року потрібна ємність резервної батареї не менше:

$$C = 24 \times 365 \times 88,55 \cdot 10^{-6} = 0,776 \text{ А/годин}$$

Треба враховувати, що ця ємність має забезпечуватись у всьому інтервалі робочих температур витратоміру ($-40..+60^{\circ}\text{C}$), а також батарея має відповідати вимогам іскробезпеки. Цим вимогам задовольняє літієва батарея AA-760 фірми Renata Battery, яка має ємність 3,8А/годин за нормальних умов та не менше 25% від номінальної ємності за температури -40°C , тобто не менше 0,95А/годин.

6.3 Опис принципової схеми інтелектуального перетворювача інтерфейсів

Інтелектуальний перетворювач інтерфейсів виконаний на базі МК типу STM32F103 фірми ST microelectronic. Цей МК має 32-розрядне ядро Cortex-M3 (ARM). МК обраний з міркувань досить високої обчислювальної продуктивності, що необхідна для реалізації можливості одночасної підтримки декількох протоколів обміну, організації роботи з GSM-модемом, а також реалізації протоколів для роботи в мережі Internet. МК має 128кБ вбудованої FLASH-пам'яті та 20кБ оперативної пам'яті.

У перетворювачі інтерфейсів як енергонезалежна пам'ять використовується зовнішня пам'ять FRAM типу FM25CL256 фірми Ramtron об'ємом 32кБ.

У пристрої є РКІ типу BC1602 фірми Volumin. Для одержання необхідної контрастності використовується джерело негативної напруги, одержуваного шляхом випрямлення імпульсів ШІМ подвійником напруги на С13 VD3 С16. Дільник R9 R11 дозволяє регулювати негативну напругу шляхом зміни шпаруватості ШІМ.

Пристрій обладнано простою клавіатурою, що складається з 4 кнопок SA1..SA4, підключених безпосередньо до портів загального призначення МК.

Для зв'язку з витратоміром використовується HART-інтерфейс. Модем реалізований на спеціалізованій ІМС DD3 типу FX614, і має трансформаторну гальванічну розв'язку від лінії зв'язку. Мостовий підсилювач на DA4 потрібен для одержання необхідного розмаху напруги. Для живлення лінії застосовується перетворювач напруги типу RO-0512D, виходи якого з'єднані послідовно для одержання напруги 24В. На виході перетворювача є фільтр С26 L3 С28 С31. Живлення лінії здійснюється через резистор R32.

Для зв'язку з іншими блоками вимірювального комплексу призначений інтерфейс RS-485 на мікросхемі DD4 типу ST485BD. Резистори R21 R22 призначені для одержання визначеного стану при обриві лінії. Для підключення ПК або модему (GSM-модему) призначений інтерфейс RS-232 на ІМС DD5 типу ST232BD. Обидва інтерфейси виведені на роз'єм XP5.

Живлення інтерфейсних ІС, а також перетворювача напруги живлення HART-лінії, здійснюється від стабілізатора напруги 5В, збудованого на ІС типу MC34063AD, що становить собою імпульсний знижуючий стабілізатор. Вхідна напруга живлення може перебувати в межах від 9 до 30В. Живлення МК, пам'яті й РКІ здійснюється від лінійного стабілізатора DA2 типу LP2981AIM5-3.3, що знижує напругу 5В до 3,3В.

ВИСНОВОК

Створення сучасних систем обліку базується на масовому впровадженні електронних пристроїв обліку (лічильників), які мають можливості довготривалого зберігання даних енергообліку та доступу до цих даних цифровими інтерфейсами.

Застосування при побудові систем обліку високоточних засобів вимірювання та забезпечення оптимальних умов їх експлуатації дозволяє мінімізувати втрати енергоресурсів в процесі їх транспортування від виробника до споживача.

З огляду на специфіку побудови й експлуатації систем технологічного й комерційного обліку енергоресурсів можна зробити наступні висновки: канали зв'язку в системах обліку енергоресурсів зазвичай організовуються на основі напівдуплексних (рідше – повнодуплексних) фізичних інтерфейсів. Найпоширенішими є фізичні інтерфейси RS485, RS232, RS422, а також канали зв'язку, організовані на базі GPRS/GSM, тональної частоти та інші. Такі канали здебільшого дозволяють використовувати методи передачі з підтвердженням прийому, що дозволяє спростити завдання передачі даних і використовувати для контролю цілісності даних циклічні контрольні суми.

Для даних, які зберігаються в енергонезалежній пам'яті систем обліку енергоресурсів, бажаним є застосування методів надлишкового кодування. Тут можливо застосування у т.ч. і кодування Хемінга.

В результаті досліджень кодів Хемінга було знайдено можливості пришвидшення практично використовуваних алгоритмів кодування при невеликих втратах корисного об'єму пам'яті, що дозволяє знижувати власне споживання систем за рахунок зниження тактової частоти або зменшення тривалості роботи мікроконтролерів в активній фазі.

Вихідна мета роботи полягала у пошуку оптимальних методів обліку газу на магістральних газопроводах та розробці власної конкурентоспроможної

системи обліку газу. Було поставлено завдання: вибрати оптимальний метод вимірювання витрати газу в магістральному газопроводі; проаналізувати фактори, що впливають на точність результату вимірювання витрати газу; проаналізувати можливі завади при зберіганні та передачі результатів вимірювання; дослідити можливості підвищення надійності зберігання та передачі даних з мінімальними додатковими вимогами до обчислювальної потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ультразвуковой измеритель объемного расхода газа FLOWSIC 600. Бюро Аналитических Комплексов и Систем. <http://www.bacs.ru/works/count/flowsick/>
2. Система коммерческого учета газа. Бюро Аналитических Комплексов и Систем. <http://www.bacs.ru/works/count/uurt/>
3. Козицкий А.И., Моргунов В.М. Вихревой расходомер-счетчик газа. Научные труды ДонНТУ. Выпуск 20, серия горно-электромеханическая. - Донецк: ДонНТУ, 2004
<http://masters.donntu.edu.ua/2005/fema/kozitsky/lib/lib.htm>
4. Козицкий А.П. Единая система учета газа. <http://masters.donntu.edu.ua/2005/fema/kozitsky/diss/chapter32.htm>
5. Современные принципы автоматизации энергоучета в энергосистемах. Новости электротехники. Информационно-справочное издание. 5 (53) 2008. <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/20/13.php>
6. Об одной неучтенной погрешности измерения расхода. И.С. Покрас, к.т.н., ведущий инженер фирмы «СЕМПАЛ», г. Киев. http://www.teplotunkt.ru/articles/0134_pjs_scr.html
7. Некоторые возможные пути усовершенствования ультразвуковых расходомеров с автономным питанием. И.А. Гришанова, И.С. Покрас, фирма «СЕМПАЛ», Киев. http://www.teplotunkt.ru/articles/0163_gia_uzb.html
8. О “диагностических” функциях приборов учета. Д.Л. Анисимов, «Теплопункт»
9. Анализ погрешностей определения потребляемой тепловой энергии в системе отопления, тепловой энергии и воды в системе ГВС. Коптев В.С., Сычев Г.И.
<http://www.teplovizor.ru/myarticles/article.php?storyid=5&storypage=5>

10. "INTEGRITY OF CUSTODY TRANSFER MEASUREMENT AND ULTRASONIC TECHNOLOGY" / "Коммерческий учет газа и ультразвуковые технологии". Рик Уилсэк, "ТрансКанада Пайплайнз", Калгари

11. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие. Москва, "Издательство стандартов", 1990г.

12. Волочій Б. Ю. Передавання сигналів у інформаційних системах. Частина 1. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005.

13. Помехоустойчивое кодирование. Материал из Викиучебника.
<http://ru.wikibooks.org/wiki/>

14. Основные принципы помехоустойчивого кодирования.
<http://kunegin.narod.ru/ref3/code/page7.htm>

15. Циклический избыточный код. Материал из Википедии — свободной энциклопедии <http://ru.wikipedia.org/wiki>

16. Ross N. Williams Элементарное руководство по CRC–алгоритмам обнаружения ошибок. <http://rdsn.ru/article/files/classes/SelfCheck/crcguide.pdf>

17. Дансмор Б. Скандер Т. Справочник по телекоммуникационным технологиям. пер.с англ. Изд. Вильямс, 2004г.

18. А.В. Оппенгеймер, Р.В. Шафер. Цифровая обработка сигналов.
<http://lord-n.narod.ru/walla.html>