

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ
ТА ЗВ'ЯЗКУ**

Кафедра „Транспортний зв'язок”

**ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ
ДИСКРЕТНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового проекту з дисципліни
**«СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ДИСКРЕТНИХ
ПОВІДОМЛЕНЬ»**

Харків – 2010

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до
друку на засіданні кафедри «Транспортний зв'язок»

5 березня 2009 р., протокол № 8.

У методичних вказівках викладені основні питання, які необхідно вирішити при проектуванні систем передачі дискретних повідомлень, методика їх вирішення і завдання на проектування.

Укладачі:

доценти М.В. Книгавко,
К.А. Трубчанінова

Рецензент

доц. С.В. Кошевий

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ
ДИСКРЕТНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ

Методичні вказівки до курсового проекту з
дисципліни «Системи та мережі передачі
дискретних повідомлень»

Відповідальний за випуск Трубчанінова К.А.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 24.04.09 р.
Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.
Умовн.-друк.арк. 5,0. Обл.-вид.арк. 5,25.
Замовлення № Тираж 150. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, майд. Фейербаха, 7



МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ І ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

УКРАЇНЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДИСКРЕТНИХ
ПОВІДОМЛЕНЬ

Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни
«Системи та мережі передачі дискретних повідомлень»

Декан ф-ту АТЗ
Прогонний

доц. О.М.

Завідуючий кафедри ТЗ
Приходько

доц. С.І.

Голова методичної ради ф-ту АТЗ
проф.О.В.Єлізаренко

Укладач доц. М.В.Книгавко

ХАРКІВ 2010

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Транспортний зв'язк» 5 березня 2009 р., протокол № 8.

У методичних вказівках викладені основні питання, які необхідно вирішити при проектуванні систем передачі дискретних повідомлень, методика їх вирішення і завдання на проектування.

Укладачі:

доценти М.В. Книгавко,
К.А. Трубчанінова

Рецензент

доц. Кошевий С.В.

ЗМІСТ

	Вступ	4
	Вихідні дані	6
1	Принципи побудови системи передачі дискретних повідомлень (СПДП)	8
1.1	Узагальнена структурна схема СПДП	8
1.2	Характеристика каналів зв'язку	13
1.3	Обмін повідомленнями в СПДП	18
1.4	Принципи системного підходу до проектування СПДП	39
1.5	Обґрунтування вимог до СПДП і критеріїв ефективності	41
2	Проектування пристрою захисту від помилок	43
2.1	Вибір варіанта структури й алгоритму обміну повідомленнями	43
2.2	Система з вирішальним зворотним зв'язком з очікуванням (ВЗЗ-ОЧ)	44
2.3	Система з вирішальним зворотним зв'язком з безперервною передачею і блокуванням (ВЗЗ-БП _{Бл})	47
2.4	Система з вирішальним зворотним зв'язком з адресним перезапиту (ВЗЗ-АП)	49
2.5	Аналіз характеристик систем із зворотними зв'язками	50
2.6	Визначення оптимальних параметрів завадостійкого коду	61
2.7	Вибір виду вирішального зворотного зв'язку	62
2.8	Розроблення алгоритму функціонування пристрою захисту від помилок	63
3	Проектування пристрою перетворення сигналу	69
4	Проектування пристрою синхронізації	77
	Список літератури	91
	Додаток А Таблиця циклічних (n, k) кодів	92
	Додаток Б Значення інтеграла ймовірностей	95
	$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$	

.....

ВСТУП

Будь-які сучасні інформаційні системи, що управляють, базуються на тісній взаємодії обчислювальної техніки і засобів передачі інформації. Абоненти цих систем, як правило, знаходяться на значній відстані від пунктів обробки інформації, тому важливе місце в системі обміну інформацією займають технічні засоби, що здійснюють передачу даних між кінцевими пунктами (джерелами і приймачами повідомлень) по каналах зв'язку із заданими якісними характеристиками, – системи передачі дискретних повідомлень.

Об'єктом курсового проектування є система передачі дискретних повідомлень, яка призначена для обміну інформацією по аналогових каналах.

У процесі проектування необхідно виконати:

- проектування пристрою захисту від помилок;
- проектування пристрою перетворення сигналів;
- проектування пристрою синхронізації;
- написати пояснювальну записку і виконати графічну частину.

При проектуванні пристрою захисту від помилок потрібно вибрати вид вирішального зворотного зв'язку, визначити параметри завадостійкого коду, розробити формат повідомлення, що передається, розробити укрупнену структурну схему пристрою захисту від помилок з указанням ланцюгів інтерфейсу, що використовується, розробити детальну функціональну схему кодека або алгоритм його програмної реалізації.

При проектуванні пристрою перетворення сигналів необхідно розрахувати необхідну швидкість передачі, визначити значення несучої частоти, позиційність модуляції, імовірність помилки на виході, розробити детальну функціональну схему пристрою з зазначенням ланцюгів

використовуваного інтерфейсу.

При проектуванні пристрою синхронізації необхідно визначити його параметри з урахуванням того, що схема має бути побудована без безпосередньої дії на місцевий генератор, розробити детальні функціональні схеми подільника частоти і реверсивного лічильника.

Пояснювальна записка повинна включати:

- титульний аркуш;
- технічне завдання на проектування;
- вступ;
- опис узагальненої структурної схеми системи передачі дискретних повідомлень;
- аналіз можливих варіантів побудови систем з вирішальним зворотним зв'язком, алгоритм вибору конкретного варіанта, що задовольняє поставлені вимоги, характеристику вибраного завадостійкого коду;
- опис роботи вибраної системи;
- алгоритм роботи пристрою захисту від помилок;
- вибір методу модуляції і несучої частоти;
- опис роботи пристрою перетворення сигналів;
- розрахунок параметрів пристрою синхронізації і опис роботи схеми;
- висновок;
- список літератури
- зміст.

Залежно від конкретного варіанта завдання на проектування в пояснювальну записку можуть бути введені додаткові розділи або деякі виключені.

Графічна частина включає повну функціональну схему пристрою, що розробляється, і деталізовані схеми окремих вузлів.

Якщо для розрахунку окремих параметрів системи знадобляться додаткові дані, не вказані у вихідних даних, то вони можуть бути задані розробником самостійно при відповідному обґрунтуванні.

1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДИСКРЕТНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ (СПДП)

1.1 Узагальнена структурна схема СПДП

Під дискретним повідомленням розуміють таке, яке на кінцевому інтервалі часу містить кінцеве число символів. Прикладами є телеграфні, факсимільні повідомлення даних. Узагальнена структурна схема СПДП наведена на рисунку 1.1.

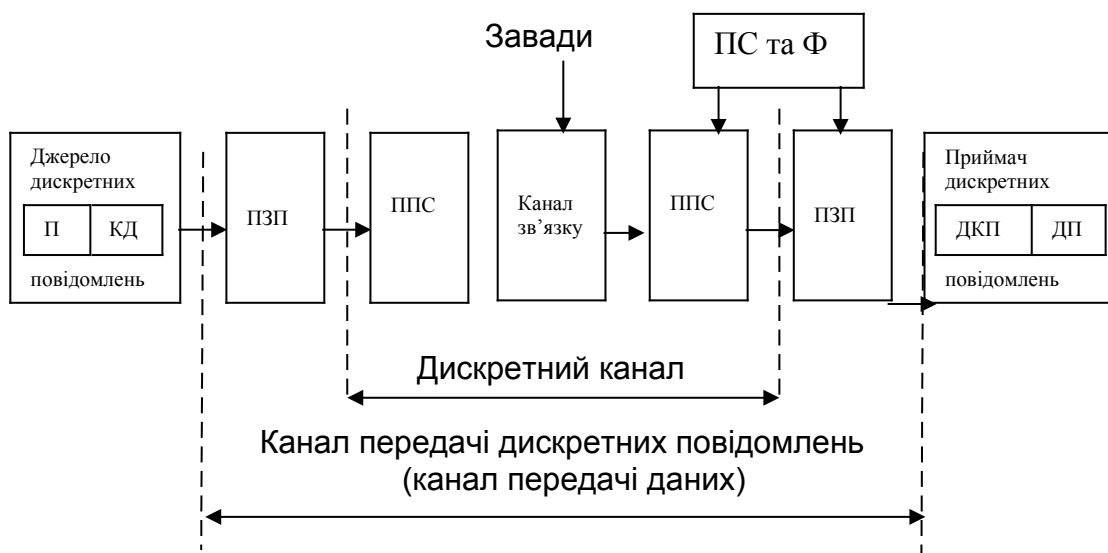


Рисунок 1.1 - Структурна схема СПДП

До складу джерела дискретних повідомлень входить перетворювач неелектричних величин в електричні (П) і кодер джерела (КД). Повідомлення, що вироблюються джерелом, можуть містити структурну й статистичну надмірність і складатися із символів, число яких не дорівнює числу символів, які можуть бути передані по дискретному каналу. Завдання усунення надмірності й узгодження алфавітів вирішує кодер джерела. Для підвищення правильності передачі по каналу зв'язку з завадами застосовуються спеціальні пристрої захисту від

помилки (**ПЗП**), принцип дії яких заснований на використанні завадостійкого кодування й алгоритмів з повтореннями. Пристрій перетворення сигналів (**ППС**) здійснює узгодження дискретних повідомлень із переносником, що використовується у каналі зв'язку.

Канал зв'язку містить у собі фізичне середовище, у якому поширюється сигнал і сукупність технічних засобів, призначених для передачі й приймання сигналів.

ППС разом з каналом зв'язку утворюють дискретний канал, тобто канал, призначений для передачі дискретних сигналів. Дискретний канал у сукупності з **ПЗП** називають каналом передачі дискретних повідомлень, а в техніці передачі даних - каналом передачі даних, **ПЗП** разом з **ППС** називають апаратурою передачі даних (**АПД**), а джерело повідомлень - кінцевим обладнанням даних (**КОД**).

Розрізняють синхронні й асинхронні дискретні канали. У синхронних каналах кожний одиничний елемент сигналу вводиться в строго певні моменти часу. Ці канали призначені для передачі тільки ізохронних сигналів. По асинхронному каналу можна передавати будь-які сигнали: ізохронні, асинхронні, відомої структури. Тому такі канали одержали назву *прозорих* або *кодонезалежних*.

Для забезпечення відповідного способу передачі в СПДП передбачений пристрій синхронізації й фазування (**ПСтаФ**). Наведена на рисунку 1.1 схема забезпечує передачу сигналів тільки в одному напрямку. Для двостороннього обміну використовуються дві односпрямовані системи, які конструктивно можуть бути виконані у вигляді однієї дуплексної системи (що використовують один канал зв'язку).

Системи передачі дискретних повідомлень характеризуються сукупністю параметрів, які поділяються на зовнішні й внутрішні [1, 2]. Зовнішні описують систему з погляду споживача. Внутрішні описують систему з погляду розроблювача.

Зовнішні параметри поділяються на інформаційні, техніко-економічні й техніко-експлуатаційні. Інформаційні

параметри характеризують можливості системи за швидкістю й завадостійкістю; техніко-економічні дають уявлення про те, якою ціною вдається одержати необхідні значення інформаційних та інших параметрів системи; техніко-експлуатаційні відображають надійність і керованість системи.

До інформаційних параметрів відносяться: правильність передачі, швидкість передачі, час доставки.

Правильність передачі оцінюється ймовірністю помилкового приймання одиничних елементів p_e й кодової комбінації p_{kk} .

$$P_e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n_{ош}}{n} \right), \quad (1.1)$$

$$p_{kk} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{N_{ош}}{N} \right),$$

де $n_{ош}$, $N_{ош}$ - кількість помилково прийнятих одиничних елементів і кодових комбінацій відповідно;
 n , N - кількість переданих одиничних елементів і кодових комбінацій відповідно.

На практиці замість імовірностей помилок користуються коефіцієнтом помилок за елементами K_e й кодovими комбінаціями K_{kk} :

$$K_e = \frac{n_{ош}}{n}, \quad (1.2)$$

$$K_{kk} = \frac{N_{ош}}{N}.$$

Значення коефіцієнта помилок за елементами нормується, наприклад, для каналів тональної частоти, що не комутуються, воно повинне бути не більше, ніж 5×10^{-5} , а для тих, що комутуються, - не більше 1×10^{-3} .

Коефіцієнт помилок за кодovими комбінаціями,

незалежно від типу каналу повинен бути не більше 1×10^{-6} .

Крім імовірностей помилкового приймання одиничних елементів, існуючі канали характеризуються також групуванням помилок - нерівномірністю розподілу їх у часі - пакетуванням.

Швидкість передачі інформації визначається кількістю інформації, що передана по каналу за одиницю часу, біт / с,

$$V = B (H_1 - H_2), \quad (1.3)$$

де $B = \frac{1}{t_0}$ - швидкість модуляції (один. елем./с або Бод);

t_0 - тривалість одиничного елемента сигналу;

$H_1 = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i$ - середня кількість інформації, що міститься в одному символі алфавіту джерела повідомлень (біт);

m - обсяг алфавіту джерела;

p_i - імовірність появи i -го символу;

$H_2 = - \sum_{i=1}^m p_i \sum_{j=1}^m p_{ij} \log_2 p_{ij}$ - середні втрати інформації, обумовлені дією завад у каналі.

p_{ij} - імовірність приймання j -го символу замість i -го (імовірність помилки).

Максимально можливе значення швидкості передачі інформації по каналу при заданих умовах називають *пропускною здатністю* C , біт / с,

$$C = B (H_{1 \max} - H_2). \quad (1.4)$$

Швидкість передачі інформації дорівнює швидкості модуляції лише в тому випадку (як видно з формули (1.3)), коли передача інформації здійснюється по каналу без перешкод ($H_2 = 0$) і повідомлення дискретного джерела складаються із двох незалежних, рівноймовірних символів ($m = 2$, $H_1 = \log_2 2 = 1$). Крім того, повідомлення не містить

службових символів, що не несуть інформації джерела.

Час доставки t_d оцінюється інтервалом між моментами видачі повідомлення джерелом і одержання його одержувачем. Час доставки залежить від багатьох факторів, у тому числі й від наявності й характеру впливів, що заважають. Це призводить до помилок і повторних передач і є випадковою величиною. Здебільшого проводять оцінку ймовірності $P(t_d < t_{кр})$ того, що повідомлення буде доставлено із заданою правильністю за час, що не перевищує деяке критичне значення $t_{кр}$.

До техніко-економічних параметрів належать вартість, габаритні розміри, маса. Кількісну оцінку вартості системи ПДП взагалі пов'язують із кількістю переданої інформації. За таку оцінку приймають вартість передачі 1 біт інформації. Ця характеристика визначається повною вартістю наведених витрат на систему й складається з капітальних витрат на виготовлення та експлуатацію.

До техніко-експлуатаційних параметрів належать надійність, температурний діапазон роботи тощо.

Надійність СПДП визначає її здатність працювати без відмов при збереженні заданих параметрів. Найважливішими показниками надійності є середній час наробітку на відмову T_n і коефіцієнт готовності K_r .

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (1.5)$$

$$K_r = \frac{T_n}{T_n + T_b}, \quad (1.6)$$

де T_i - час безвідмовної роботи між i -ю і $(i + 1)$ -ю відмовами;

n - загальне число відмов за час спостереження;

T_b - час відновлення апаратури, обумовлений часом відшукання й усунення даної відмови.

До числа внутрішніх параметрів належать питома швидкість передачі, інформаційна ефективність, складність, технічні рішення.

Питома швидкість передачі γ характеризує ефективність використання каналу зв'язку й чисельно дорівнює відношенню швидкості передачі інформації V до смуги пропускання каналу ΔF_k , біт / с \times Гц,

$$\gamma = \frac{V}{\Delta F_k} . \quad (1.7)$$

Інформаційна ефективність η визначається відношенням швидкості передачі до пропускну здатності каналу:

$$\eta = \frac{V}{C} . \quad (1.8)$$

Розрізняють алгоритмічну й структурну складність. Систему передачі дискретних повідомлень можна розглядати як деякий обчислювальний пристрій, алгоритм роботи якого визначає послідовність операцій, що виконуються над вхідним повідомленням для перетворення його у вихідне повідомлення. Звідси алгоритмічну складність можна оцінити числом логічних, арифметичних операцій і обсягом пам'яті, необхідними для забезпечення перетворення. Структурна складність визначається числом базових вузлів, необхідних для побудови надійно функціонуючої системи. У якості базових можуть прийматися вузли, обумовлені перспективною й освоєною промисловістю мікросхемотехнікою.

Конкретна технічна реалізація повинна опиратися на оптимальне співвідношення апаратних і програмних засобів.

1.2 Характеристика каналів зв'язку

Для передачі дискретних сигналів використовуються

канали систем передачі й фізичних ланцюгів різних ліній зв'язку. Канали систем передачі можуть бути аналоговими й цифровими.

Характеристики каналу зв'язку значною мірою визначають основні параметри СПДП. Тому значення цих характеристик становлять першорядний інтерес для розроблювача систем ПДП.

У реальних каналах вихідний сигнал завжди відрізняється від вхідного, причому зміни носять як детермінований, так і випадковий характер. Зміни сигналу характеризуються зміною форми, масштабу (посиленням або ослабленням) і затримкою в часі. Постійно діючі фактори призводять до детермінованих змін, а різного роду завади - до випадкових змін.

Детерміновані спотворення форми сигналу обумовлюються відхиленням реальних частотних характеристик каналу від ідеальних і викликаються обмеженням спектра сигналу й нерівномірністю амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) і нелінійністю фазо-частотної характеристики (ФЧХ) каналу.

Обмеження спектра сигналу призводить до виникнення перехідного процесу в зміні інформаційного параметра переносника [1, 3]. Тривалість перехідного процесу в основному визначається часом наростання й залежить від виду модуляції, що використовувався (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Вид модуляції	Відеоімпульс	Амплітудна	Фазова	Частотна
Час наростання	$\frac{1}{2f_{гр}}$	$\frac{1}{\Delta F}$	$\frac{1}{\Delta F}$	$\frac{1}{\Delta F}$
Примітки: $f_{гр}$ - гранична частота смуги пропущення фізичного ланцюга; ΔF - ширина смуги пропущення каналу				

Нерівномірність АЧХ і нелінійність ФЧХ призводять до появи на виході каналу випереджальних й відставальних луна-сигналів, що викликає, як і при обмеженні спектра,

спотворення форми й тривалості вхідного сигналу, однак на величині часу наростання перехідного процесу це практично не позначається.

Зміна тривалості (в основному за рахунок перехідного процесу) вхідного сигналу призводить до того, що одиничні елементи сигналу, розтягуючись у часі, перекриваються сусідніми елементами. Це є причиною виникнення міжсимвольної інтерференції (МСІ) і, як наслідок, зниження завадостійкості.

У каналах, де несуча частота порівнянна за значенням із шириною смуги пропускання (що спостерігається при передачі дискретних сигналів по каналу ТЧ), виникають додаткові спотворення, що викликаються потраплянням у смугу пропускання каналу частини частот нижньої бічної смуги [3]. Ці додаткові складові є своєрідною завадою, що впливає на сигнал таким чином, що фронти перехідного процесу зміщуються уздовж часової осі в межах деякої області. Ці зсуви одержали назви "хитання фронтів".

Ширина області хитань дорівнює

$$\Delta\tau_{\text{кач}} = \frac{1}{2\pi f_0}, \quad (1.9)$$

де f_0 - частота несучого коливання.

Причинами, що викликають випадкові зміни сигналу на виході каналу, є адитивні й мультиплікативні завади. Адитивні завади містять три складові: гармонійні, імпульсні, флуктуаційні. Зміни сигналу внаслідок дії адитивних завад проявляються у вигляді зміни його тривалості.

Мультиплікативні завади виражаються в основному у повільній і швидкій зміні залишкового загасання каналу (залишковим загасанням називається різниця між рівнями сигналу на вході й виході каналу зв'язку), які призводять до плавних і стрибкоподібних змін рівня сигналу відповідно. Заниження рівня за значенням більше 17,4 дБ щодо номінального значення називається перервою. При цьому якщо тривалість перерви менше 300 мс, то вона вважається

короткочасною, якщо більше 300 мс - тривалою. Ця границя обрана, виходячи із прийнятих у комутаційній техніці технічних рішень, при яких перерва тривалістю більше 300 мс призводить до руйнування з'єднання, тобто до відмови.

Ще одним специфічним фактором, що спотворює сигнали, є наявність "луна-сигналів", що виникають за рахунок відбиття переданого сигналу в місцях непогодженості опорів лінії й дифсистем і невисокого перехідного загасання дифсистем.

Пороговий пристрій на виході дискретного каналу відновлює прямокутну форму елементів сигналу. Порівнюючи послідовності елементів сигналів на вході й виході дискретного каналу, виявляється часова невідповідність між ними, що проявляється у вигляді зсувів границь елементів сигналу, що приводять до зміни їхньої тривалості (крайових спотворень) і дроблень значущих позицій.

Крайові спотворення як випадкова величина підкоряються нормальному закону розподілу:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta - a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1.10)$$

де δ - випадкова величина крайових спотворень;

a - математичне очікування величини спотворень;

σ - середньоквадратичне відхилення δ від a .

Дроблення характеризуються тривалістю $\tau_{др}$, моментом виникнення (початком) дроблення $t_{др}$ та інтенсивністю, тобто середнім числом дроблень в одиницю часу.

Крива розподілу дроблень близька до логарифмічно нормального закону:

$$f(\tau_{др}) = \frac{1}{\tau_{др}\sigma_\tau\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln\tau_{др} - m)^2}{2\sigma_\tau^2}\right), \quad (1.11)$$

де m - середнє значення величини $\ln \tau_{др}$;

σ_τ - середньоквадратичне відхилення випадкової величини $\ln \tau_{др}$ від m .

Розподіл розпочатку імпульсів дроблень підкоряються рівномірному закону:

$$f(t_{др}) = \frac{1}{t_0} \cdot \quad (1.12)$$

де $t_{др}$ - момент початку імпульсу дроблення;

t_0 - тривалість одиничного інтервалу (елемента сигналу).

Якість передачі сигналів по цифрових каналах оцінюється коефіцієнтом помилок на швидкості передачі 64 кбіт/с на каналі довжиною 27500 км, що складається з національних і міжнародних ділянок (рисунки 1.2, 1.3). Національна ділянка при організації міжнародного з'єднання має допустимий коефіцієнт помилок K_e , що дорівнює $0,4 \times 10^{-6}$.

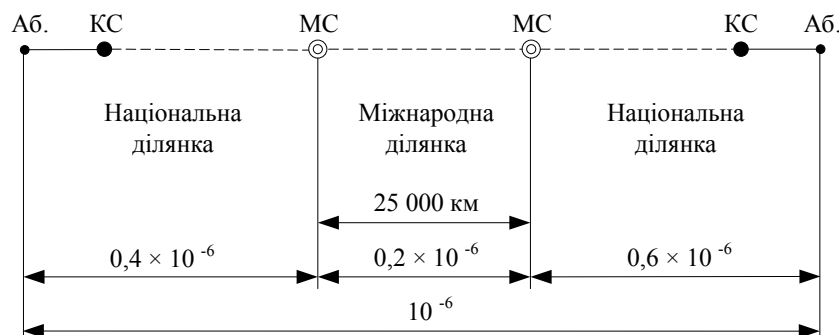


Рисунок 1.2 - Нормування коефіцієнта помилок при міжнародному з'єднанні

На рисунку 1.2 позначена: ОС – кінцева станція; МС – міжнародна станція. Коефіцієнт помилок K_e позначається BER, Bit Error Rate.

Часові інтервали вимірювання BER, рекомендовані МСЕ-Т для лінійних трактів, наведені нижче:

$K_e = 10^{-3}$ для $t = 10$ мс;
 $K_e = 10^{-4}$ для $t = 100$ мс;
 $K_e = 10^{-5}$ для $t = 1$ с;
 $K_e = 10^{-6}$ для $t = 10$ с;
 $K_e = 10^{-7}$ для $t = 100$ с;
 $K_e = 10^{-8}$ для $t = 1\ 000$ с;
 $K_e = 10^{-9}$ для $t = 10\ 000$ с;

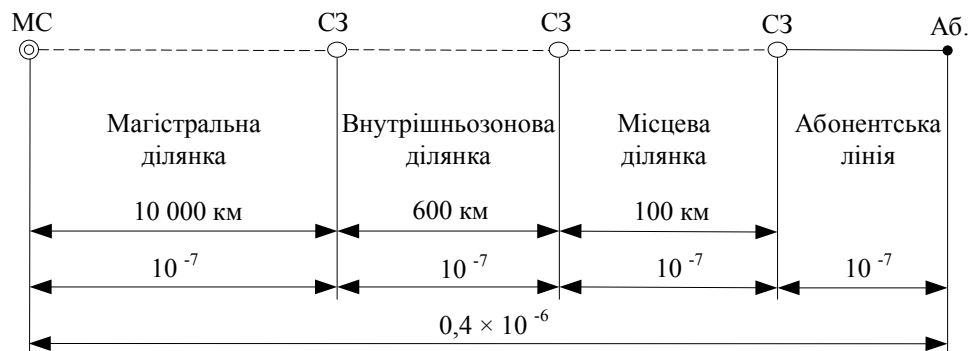


Рисунок 1.3 - Нормування коефіцієнта помилок у цифровому каналі при міжнародному з'єднанні на національній ділянці

З огляду на те, що при цифровій передачі в каналі помилки підсумуються, можна одержати умову за припустимою величиною коефіцієнта помилок на довжині лінійного тракту в 1 км:

- для магістральної ділянки $K_{e\text{ м}} = 10^{-7}/10\ 000 = 10^{-11}$;
- для внутрішньозонової ділянки $K_{e\text{ в}} = 10^{-7}/600 = 1,67 \times 10^{-10}$;
- для місцевої ділянки $K_{e\text{ в}} = 10^{-7}/100 = 10^{-9}$.

1.3 Обмін повідомленнями в СПДП

Обмін повідомленнями в системах передачі дискретних

повідомлень, включаючи процес встановлення з'єднання по каналам, що комутуються, здійснюється на підставі стандартних процедур, сукупність яких називають протоколами.

Основні функції протоколів полягають у керуванні потоками інформації, виборі алгоритму маршрутизації, захисту переданої інформації від можливих помилок. Вони стандартизують всі можливі ситуації, які можуть виникнути при взаємодії об'єктів, контролюють ці ситуації й пропонують правила реагування на кожну з них з метою підвищення правильності передачі.

У 1983 році Міжнародною організацією зі стандартизації (International Organization for Standardization, ISO) введена концепція Взаємозв'язку Відкритих Систем (ВВС), яка представлена ієрархією рівнів протоколів (таблиця 1.2). Кожний рівень містить одну або кілька функцій, логічно обмежених зверху й знизу. Кожний рівень використовує послуги нижніх рівнів разом зі своїми власними функціями для створення нових послуг, які стають доступними верхнім рівням. Базовою еталонною моделлю є семирівнева модель [1, 3, 4].

Таблиця 1.2

Номер рівня	Назва рівня	Основні виконувані функції
7	Прикладний	Обробка інформації згідно з програмами користувача
6	Представницький	Перетворення інформації до виду, зрозумілому користувачеві
5	Сеансовий	Установлення й закінчення сеансу зв'язку між користувачами
4	Транспортний	Забезпечення гарантованої доставки повідомлення користувачеві незалежно від мережі зв'язку, що використовується
3	Мережний	Маршрутизація й комутація
2	Канальний	Формування блоків повідомлень (кадрів), керування передачею, захист від помилок, фазування

1	Фізичний	Установлення з'єднання з фізичним середовищем, передача сигналів, синхронізація
---	----------	---

Всі рівні відповідно до їх функцій поділяють на три групи: інформаційні (5...7 рівні), транспортні (4 рівень) і передачі даних (1...3 рівні). Інформаційні рівні відрізняє те, що вони не пов'язані безпосередньо із процесом передачі повідомлень. Транспортний рівень необхідний для інформаційної взаємодії різних користувачів, його послуги не залежать від типу переданих даних.

Системи передачі дискретних повідомлень забезпечують виконання функцій 1-го й 2-го рівнів.

Фізичний рівень (1-й рівень) іноді називають електричним. На цьому рівні здійснюється передача дискретних сигналів у вигляді послідовності імпульсів через фізичне середовище, що з'єднує реальні об'єкти інформаційної мережі. В якості такого середовища можуть використовуватися канали зв'язку. Для узгодження фізичних параметрів каналу із сигналом використовуються пристрої перетворення сигналів. Передача сигналу може здійснюватися поперемінно або одночасно у двох протилежних напрямках. Елементи сигналу можуть передаватися в канал синхронним або асинхронним (старт-стопним) способом. На цьому рівні визначаються швидкість модуляції, форма подання логічного нуля й логічної одиниці, число контактів у рознімачі, їхнє призначення, електричні й механічні характеристики, виконуються операції синхронізації за елементами. При використанні каналів, що комутуються, фізичний рівень надає засоби для створення, підтвердження й роз'єднання з'єднань між абонентами.

Функцією фізичного рівня є також забезпечення інтерфейсу з каналним рівнем. Інтерфейсом визначається склад і структура керуючих сигналів і даних, а також правила функціонування виділених каналів.

На каналному рівні (2-й рівень) організується канал передачі даних, у якому передбачається керування

передачею й захист від помилок, що виникають у процесі передачі по фізичному середовищу.

Процедура керування передачею складається з формування кодових комбінацій (знаків), контролю правильності приймання послідовності кодових комбінацій, формування кадрів, контролю правильності кадрів, регулювання потоку переданої послідовності кадрів.

З фізичного рівня на канальний через інтерфейс передаються сигнали синхронізації. Вони дозволяють із послідовності символів сформувати на канальному рівні кодові комбінації, а з кодових комбінацій сформувати кадри. На канальному рівні повинна бути забезпечена кодонезалежність передачі даних. Користувач може застосовувати стандартні коди або використовувати свою послідовність.

У процесі приймання контролюється правильність послідовності кадрів, регулюється темп видачі інформації користувачеві, тобто затримка передачі й швидкість обміну, тому що швидкий передавач може "завалити" приймач даними.

Процедура захисту від помилок забезпечує виявлення й виправлення помилок, що виникають на фізичному рівні. Протоколи канального рівня використовують завадостійкі коди й алгоритми зі зворотними зв'язками (з перезапитами). При виникненні непереборної помилки повідомлення про це передається на верхній, третій, рівень протоколів.

Протоколи канального рівня можуть реалізовуватися програмним або апаратним способом, у тому числі за допомогою спеціально розроблених ВІС.

1.3.1 Інтерфейси фізичного рівня

Інтерфейс являє собою сукупність засобів і процедур, необхідних для реалізації взаємодії різних функціональних

частин системи й спрямованих на забезпечення їх інформаційною, електричною й конструктивною сумісністю [4, 5]. У них визначаються спосіб модуляції, що використовується, швидкість передачі, спрямованість передачі (дуплекс, напівдуплекс, симплекс), орієнтованість на виділений або комутований канал, електричні характеристики, функціональне призначення ланцюгів, сигнали керування і їхня послідовність у часі, механічні характеристики.

Європейські й американські організації зі стандартів встановили угоди за деякими рекомендаціями, що описує фізичний інтерфейс. У таблиці 1.3 перераховані деякі інтерфейси, що використовуються.

Таблиця 1.3

Європейський стандарт	Американський стандарт	Синхр./ Асинхр.	Симетр./ несиметр.	Максимальна швидкість, біт/с
V.24/V.28	RS-232C	A+C	H	20 000
V.36	RS-449	A+C	H/C	2 000 000
X.26(V.10)	RS-423A	A+C	H/C	10 000
X.27(V.11)	RS-422A	A+C	C	10 000 000
X.21 (X.26/27)		C	H/C	48 000
X.21 bis(V.26)		C	H	9 600
X.21 bis(V.26/27)		C	H/C	48 000
V.35		C	H+C	48 000

Існують два типи електричних інтерфейсів: симетричний (С) і несиметричний (Н). У симетричному інтерфейсі кожний ланцюг має два провідника, у несиметричному у всіх ланцюгів є один загальний зворотний провідник. Максимальна швидкість передачі залежить від довжини інтерфейсного кабелю.

Значення напруг, що відповідають логічним символам "0" і "1", наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Інтерфейс	Значення напруги, В		Полярність	
	Максимальне	Мінімальне	" 1 "	" 0 "
V.28 RS-232C	25	3	–	+
RS-422A RS-423a	6	0,2	–	+
X26(V10) X27(V11) V35	10	0,3	–	+

Інтерфейс RS-232C (V24/V28) - несиметричний інтерфейс між КОД і АПД, що працює в режимі асинхронного і синхронного послідовного обмінів даними на відстані до 15 м.

Опис ланцюгів обміну еквівалентний Європейському стандарту МККТТ V.24, за характеристиками електричного сигналу - V.28, а за механічними характеристиками - опису 25-контактного інтерфейсного роз'єму (ISO 2110).

В асинхронному режимі передача здійснюється старт-стопним способом кодом КОІ-7 (ASCII) з перевіркою на парність або КОІ-8 без перевірки на парність. Стоповий символ може мати тривалість в один або два одиничних елементи.

У таблиці 1.5 наведена нумерація контактів рознімача, їхнє позначення й відповідні сигнали.

Таблиця 1.5

Номер контакту	Позначення RS-232C	Позначення МККТТ V.24 ISO 2110	Призначення ланцюга	Напрямок до	
				АПД	КОД
1	2	3	4	5	6
1	AA	-	Захисне заземлення		
2	BA	103	Дані, що передаються	*	
3	BB	104	Дані, що приймаються		*
4	CA	105	Запит передачі. Готовність до приймання	*	
5	CB	106	Готовий до передачі		*
6	CC	107	АПД готова до роботи		*
7	AB	102	Сигнальне заземлення або загальний зворотний провідник		
8	CF	109	Детектор лінійного сигналу, що приймається. Індикація знаходження рівня прийнятого сигналу у встановлених межах		*
9			Резерв		
10			Резерв		
11	-	126	Вибір частоти передачі	*	
12	SCF	122	Детектор прийнятого лінійного сигналу зворотного каналу. Аналогічно ланцюгу 109		*
13	SCB	121	Зворотний канал готовий. Готовність АПД передавати дані по зворотному каналу		*
14	SBA	118	Дані зворотного каналу, що передаються	*	
15	DB	114	Синхронізація елементів сигналу, що передається		*
16	SBB	119	Дані зворотного каналу, що приймаються		*
17	DD	115	Синхронізація елементів сигналу, що приймається		*
18	-	141	Місцевий шлейф	*	

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4	5	6
19	SCA	120	Включити сигнал передачі зворотного каналу	*	
20	CD	108/1 108/2	Підключити АПД до лінії. Готовність терміналу	*	
21	CG	110	Детектор якості сигналу. Індикація наявності помилки в прийнятих по каналу даних		*
	RL	140	Експлуатаційна перевірка		
22	CE	125	Індикатор виклику. Індикація одержання АПД сигналу виклику		*
23	CH	111	Перемикання швидкості передачі даних КОД	*	
	CI	112	Перемикання швидкості передачі даних АПД		
24	DA	113	Синхронізація елементів сигналу, що передається	*	
25	-	142	Індикатор тестування в АПД		*

Інтерфейс RS - 449 (V.36). Цей інтерфейс передбачений для передачі на більш далекій відстані й з більшими швидкостями, ніж інтерфейс RS-232C. Механічні характеристики 37-контактного інтерфейсного рознімача й додаткового 9-контактного рознімача для допоміжного (зворотного) каналу зв'язку визначаються стандартом ISO 4902. У таблиці 1.6 наведені позначення контактів і відповідні сигнали. Багато із цих сигналів мають еквівалентні в RS-232C. Інтерфейс RS-449 має два окремих стандарти, які визначають несиметричний електричний інтерфейс **RS-423A**, еквівалентний інтерфейсу X.26 МККТТ (V.10), і симетричний електричний інтерфейс **RS-422A**,

еквівалентний інтерфейсу X.27 МККТТ (V.11). Ці інтерфейси працюють на відстанях і зі швидкостями передачі, наведеними в таблиці 1.7.

Таблиця 1.6

Номер контакту	Позначення RS-449	Позначення ISO 4902	Призначення ланцюга	Напрямок до	
				АПД	КОД
1	2	3	4	5	6
37 - контактний рознімач					
1	-	-	Екран (Захисне заземлення)		
2	SI	112	Індикатор швидкості передачі		*
3	-	-	Резерв		
4	SD	103	Дані, що передаються	*	
5	ST	114	Синхронізація елементів сигналу, що передається		*
6	RD	104	Дані, що приймаються		*
7	RS	105	Запит передачі	*	
8	RT	115	Синхронізація приймання		*
9	CS	106	Готовність до передачі		*
10	LL	141	Місцевий шлейф	*	
11	DM	107	Режим даних		*
12	TR	108/1 108/2	Вхідний запит з'єднання	*	
13	RR	109	Готовність приймача		*
14	RL	140	Вилучений шлейф	*	
15	IC	125	Вхідний запит з'єднання		*
16	SR	111	Вибір швидкості передачі	*	
	SF	126	Вибір частоти передачі		
17	TT	113	Синхронізація терміналу	*	
18	TM	142	Режим контролю		*
19	SG	102	Сигнальне заземлення	*	
20	RC	102	Загальне зворотний провідник приймання		*
21			Резерв		
22	SD		RS-422, зворотне введення	*	
23	ST		RS-422, зворотне введення		*
24	RD		RS-422, зворотне		*

			введення		
--	--	--	----------	--	--

Продовження таблиці 1.6

1	2	3	4	5	6
25	RS		RS-422, зворотне введення	*	
26	RT		RS-422, зворотне введення	*	
27	CS		RS-422, зворотне введення		*
28	TS	135	Термінал працює	*	
29	DM		RS-422, повернення		*
30	TR		RS-422, повернення	*	
31	RR		RS-422, повернення		*
32	SS	116	Вибір резервного каналу	*	
33	SQ	110	Якість сигналу		*
34	NS	136	Новий сигнал	*	
35	TT		RS-422, повернення	*	
36	SB	117	Індикатор резервного каналу		*
37	SC	102	Загальний зворотний провідник передачі	*	
9 - контактний рознімач					
1			Екран		
2	SRR	122	Детектор несучого зворотного каналу		*
3	SSD	118	Дані зворотного каналу, що передаються	*	
4	SRD	119	Дані зворотного каналу, що приймаються		*
5	SG	102	Сигнальне заземлення		
6	SRC	102b	Загальне повернення АПД		*
7	SRS	120	Запит передачі зворотного каналу	*	
8	SCS	121	Готовність зворотного каналу		*
9	SC	102a	Загальне повернення КОД	*	

Таблиця 1.7

Швидкість передачі, кбіт/с			Довжина кабелю, м
RS-423A (V.10 і X.26)	RS -422A симетричний (V.11 і X.27)	RS -422A несиметричний (V.11 і X.27)	
1	100	10	1 000
10	1 000	100	100

100	10 000	1 000	10
-----	--------	-------	----

Інтерфейс V.35. Рекомендація V.35 визначає синхронний інтерфейс для роботи по аналогових широкополосних каналах зі смугою пропускання 60-108 кГц зі швидкістю передачі до 48 кбіт/с. Максимальна довжина інтерфейсного кабелю 15 м. У якості інтерфейсного рознімача використовується 34-контактний рознімач. Інтерфейс використовує комбінацію несиметричних (V.24/V.28) і симетричних (V.35) ланцюгів. У таблиці 1.8 наведені позначення контактів рознімачів ISO 2593. Контакти несиметричного ланцюга використовують один контакт, показаний у стовпці А. Кожний симетричний ланцюг використовує два контакти, показані в стовпцях А і Б.

Таблиця 1.8

Позначення контакту		Ланцюг обміну МККТТ	Призначення ланцюга	Напрямок до	
А	Б			АПД	КОД
A		101	Захисне заземлення	*	*
B		102	Сигнальне заземлення	*	*
C		105	Запит передачі	*	
D		106	Готовність до передачі		*
E		107	Готовність АПД		*
F		109	Виявлення несучої		*
H		108/1;108/2	Підключення АПД до лінії. Готовність терміналу	*	
J		125	Індикатор з'єднання	*	
K,L,M,N			Резерв для ІТУ-Т		
P	S	103	Дані, що передаються	*	
R	T	104	Дані, що приймаються		*
U	W	113	Синхронізація передачі	*	
V	X	115	Синхронізація приймання		*
Y	AA	114	Синхронізація передачі		*
Z,BB,CC,DD,EE,FF			Резерв для ІТУ -Т		
HH,JJ,KK,LL			Резерв для використання в конкретній країні		
MM,NN			Резерв для ІТУ -Т		

Інтерфейс X.21 і X.21bis. Визначає фізичні характеристики й процедури керування в режимі синхронної

передачі й може застосовуватися в цифрових мережах, як з комутацією каналів, так і на виділених лініях. Стандарт передбачає дуплексну роботу КОД за умови, що АПД пов'язані один з одним реальними, а не віртуальними цифровими каналами.

Електричні характеристики ланцюгів визначені в рекомендації X.27, альтернативні (для швидкостей до 9600 біт/с) - у рекомендації X.26. Функції ланцюгів визначені в рекомендації X.24, а механічні характеристики й позначення контактів рознімачів визначені стандартом ISO 4903 (15-контактний рознімач). Електричні характеристики X.27 передбачають використання кожним симетричним ланцюгом двох проводів (контактів), позначених у таблиці 1.10 через А і Б.

Рекомендація X.21 визначає формат переданих знаків кодом МТК-5. Кожний знак містить 8 символів: сім інформаційних кодів МТК-5 і один символ контролю за непарністю.

Інтерфейс X.21 може знаходитись або в режимі перенесення даних, або в режимі керування. Застосування потоку керуючих символів дає можливість застосування різних керуючих алгоритмів. Такий підхід є більш гнучким порівняно з іншими варіантами інтерфейсів, що використовують для кожного керуючого сигналу окрему лінію. Функціональні процедури встановлення з'єднань і передачі даних можна знайти в рознімачах [4, 5].

Рекомендація X.21bis є тимчасовою альтернативою X.21 і припускає використання в мережах передачі даних КОД, розрахованого на сполучення із синхронними модемами, що працюють по аналогових каналах.

Основна відмінність рекомендації X.21 від X.21 bis полягає в тому, що в X.21 використовуються ланцюги нового стику X.24, а в X.21 bis - ланцюги рекомендації V.24. Крім того, у X.21 сигнали керування кодуються знаками коду МТК-5, а в X.21 bis для кожного сигналу є окремий ланцюг. Електричні й механічні характеристики ланцюгів інтерфейсу можуть відповідати рекомендаціям V.28, X.26 і мати 25- або

37-контактний рознімач відповідно.

Таблиця 1.9

Номер контакту	Ланцюг обміну	Призначення ланцюга	Напрямок до	
			АПД	КОД
1	-	Захисне заземлення		
2	T	Передача (А)	*	
3	C	Керування (А)	*	
4	R	Приймання (А)		*
5	I	Індикація (А)		*
6	S	Синхронізація (А)		*
7	B	Байт-Синхронізація (А)		*
8	G	Сигнальне заземлення	*	
9	T	Передача (Б)	*	
10	C	Керування (Б)	*	
11	R	Прийом (Б)		*
12	I	Індикація (Б)		*
13	S	Синхронізація (Б)		*
14	B	Байт-Синхронізація (Б)		*
15	-	Резерв		

1.3.2 Протоколи каналного рівня

Протоколи каналного рівня поділяються на напівдуплексні й дуплексні. Дуплексний протокол може працювати і як напівдуплексний.

Найбільш відомим є дуплексний біт-орієнтований протокол HDLC (High Level Data Link Control - високорівнева процедура керування каналом передачі даних), розроблений Міжнародною організацією зі стандартизації.

На основі протоколу HDLC розроблено безліч інших, що є по своїй суті деякою адаптацією й спрощенням ряду його можливостей стосовно конкретної області застосування. До такої підмножини HDLC належать протоколи SDLC (*Synchronous Data Link Control*), LAP (*Link Access Procedure*), LAPB (*Link Access Procedure Balanced*), LAPD (*Link Access Procedure D-channel*), LAPM (*Link Access Procedure for Modems*), LLC (*Logical Link Network*), LAPX (*Link Access Procedure eXtention*) і ряд інших. Наприклад, протоколи LAPB

і LAPD застосовуються в цифрових мережах ISDN (*Integrated Services Digital Network*), LAPM є базовим для стандарту корекції помилок V. 42, LAPX є напівдуплексним варіантом HDLC і використовується в термінальних мережах і системах, що працюють у стандарті Teletex, а протокол LLC (*Link Logic Control*) реалізований практично у всіх мережах із множинним доступом (наприклад, у локальних мережах). На рисунку 1.4 зображене сімейство протоколу HDLC і області його застосування.

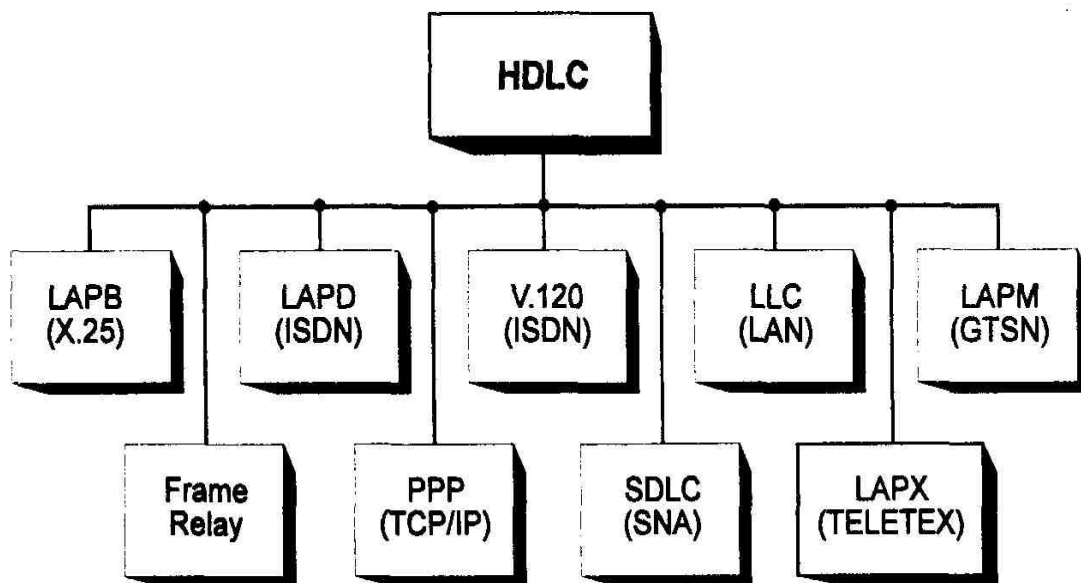


Рисунок 1.4 - Сімейство протоколів HDLC

У всіх протоколах використовується сполучення підтвердження з передачею даних. Підтвердження на правильно прийняті кадри даних передаються як окреме поле у вихідних кадрах даних. Якщо даних для передачі немає, підтвердження пересилається в спеціальних кадрах.

Протокол HDLC забезпечує передачу інформації між кінцевим устаткуванням передачі даних і мережею (апаратурою передачі даних), а також між вузлами мережі. Інформація, що передається, містить дані й керуючу інформацію для встановлення, підтримки, контролю й

завершення передачі даних. Процедура керування каналом передачі даних включає такі функції:

- синхронізацію кадрів: синхронізацію приймача з передавачем за допомогою особливої послідовності символів, що називають прапором;
- керування каналом: установлення, підтримка й закінчення передачі даних;
- реєстрацію виняткових випадків і відновлення: виявлення помилок передачі, процедурних помилок і т.д. і вживання заходів з їхнього усунення [4].

Структура кадру

Структура кадру протоколу високого рівня керування каналом передачі даних визначена в такий спосіб:

ПРАПОР	АДРЕСА	КЕРУВАННЯ	ІНФОРМАЦІЯ	КПП	ПРАПОР
8	8	8/16	N	16	8
символів	символів	Символів	символів	символів	символів

Цей формат кадру називають «довгим». Є також «короткий» формат кадру, що відрізняється від «довгого» тим, що не має поля інформації.

Для перевірки помилок у кадрах використовується кадрова перевірна послідовність (КПП), породжувана за допомогою полінома CRC-16 ($x^{16}+x^{12}+x^5+1$), визначеного в рекомендації V.41 МККТТ. У протоколі HDLC циклічна перевірка являє собою ділення, яке виконується як передавальним, так і приймальним пристроями. Діленням є числове двійкове значення адресного, керуючого й інформаційного (у випадку його присутності) полів. Як дільник використовується 16-бітова константа (CRC-16 МККТТ). Частка відкидається, а залишок використовується в якості кадрової перевіркової послідовності. Виявлення помилок виконується шляхом порівняння перевіркової послідовності, сформованої на приймальному кінці з прийнятою.

Якщо в адресному полі знаходиться адреса віддаленої

станції, то кадр містить команду, якщо адреса місцевої станції, то кадр містить відповідь.

Для позначення границь кадру використовується кодова комбінація 01111110, названа «ПРАПОРОМ».

Кодова комбінація, що містить від семи до п'ятнадцяти послідовних одиниць, є сигналом переривання передачі й використовується передавальним пристроєм для скидання кадру, передача якого вже почалася.

Прозорість даних в адресних, керуючих та інформаційному полях кадру HDLC досягається за допомогою «вставлення/стирання нульового символу». Вставлення нульового символу виконується на передавальному кінці, а викреслювання - на прийомному. Передавальний пристрій вставляє додатковий нульовий символ у переданий послідовний потік, якщо виявляє 6-символьну комбінацію 011111, оскільки наступними двома послідовними символами можуть виявитися 10 (що означає псевдопрапор) або 11 (псевдосигнал «переривання»). Приймальний пристрій виконує зворотну операцію й викреслює останній нуль із будь-якої прийнятої послідовної комбінації 0111110.

На передавальному кінці справжні комбінації «ПРАПОР» і «ПЕРЕРИВАННЯ» обходять схему вставлення нульового біта й тому однозначно сприймаються на приймальному кінці.

Поле керування містить ідентифікатор типу кадру, номер кадру, команду або відповідь, функцію опитування або закінчення.

У процедурах керування каналом застосовується три типи кадрів:

- інформаційний (I-Кадр), що має довгий формат;
- супервізорний (S-Кадр), що має короткий формат;
- ненумерований (U-Кадр), що має короткий формат.

Інформаційний кадр використовується на етапі передачі інформації з каналу від однієї станції до іншої.

Супервізорний кадр забезпечує виконання функцій етапу керування передачею інформаційних кадрів. Він містить відомості про готовність або неготовність до приймання, про появу або відсутність помилок у вмісті кадру, запит повторної передачі. Ненумерований кадр призначений для виконання функцій етапу встановлення й припинення зв'язку двох станцій, з'єднаних інформаційним каналом.

Зміст поля керування розглянутих кадрів наведено на рисунку 1.5.

Тип кадру	Розряди поля керування							
	8	7	6	5	4	3	2	1
I інформаційний	N(R)			P/F	N(S)			0
S супервізорний	N(R)			P/F	Код команди або відповіді S S		0	1
U ненумерований	Код команди або відповіді M M M			P/F	Код команди або відповіді M M		1	1

N(S) - порядковий номер переданого кадру;

N(R) - порядковий номер очікуваного при прийманні кадру (підтвердження прийнятих кадрів до номера N(R)-1);

P/F - символ опитування/закінчення

Рисунок 1.5 - Формат поля керування

П'ятий розряд використовується для запису символу опитування (P)/відповідь (F). P записується в кадрі, що містить команду, а F у кадрі, що містить відповідь. Якщо P=1, то передавальний кінець очікує відповідь із F=1.

Якщо P=0, то у відповіді на команду, що посилається,

немає необхідності. Ознаки Р і F завжди змінюються в парі. У кожний момент часу може очікувати відповіді тільки одне опитування.

По інформаційному каналу передається два зустрічних потоки І-Кадрів. Для керування цими потоками й безпомилкової ідентифікації кадрів на кожній станції організовується по два лічильники. Один з них підраховує інформаційні кадри, передані станцією, другий - отримані. Розбіжність вмісту лічильників і номерів, записаних в області керування, призводить до необхідності запиту на повторну передачу.

Кожний з нумерованих або супервізорних кадрів передає команду або відповідь, що забезпечує керування інформаційним каналом.

Команди й відповіді, що використовуються в протоколі HDLC, наведені в таблиці 1.10.

Таблиця 1.10

Тип нумерованого кадру	Розряди поля керування					Команда
	8	7	6	4	3	
SARM	0	0	0	1	1	установити режим асинхронних відповідей
SNRM	1	0	0	1	1	установити режим нормальних відповідей
SABM	0	0	1	1	1	установити асинхронний балансний режим
DISC	0	1	0	0	0	припинити зв'язок (роз'єднання)
FRMR	1	0	0	0	1	відмова від кадру
						Відповідь
UA	0	1	1	0	0	підтвердження
CMDR	1	0	0	0	1	відмова від команди
Тип супервізорного кадру						Команда/відповідь
RR				0	0	готовий до приймання
REJ				1	0	відмова від кадру

RNR				0	1	не готовий до примання
SREJ				1	1	селективна відмова від кадру

Всі передані команди в нумерованих кадрах повинні підтверджуватися про їхнє правильне прийняття відповіддю UA. Відповідь CMDR посилається в тих випадках, коли прийнята команда не може бути виконана, що має місце в таких випадках:

- приймання команди, що не використовується;
- приймання нестандартного кадру.

Відповідь FRMR посилається у випадку приймання нестандартного кадру й кадру з неприпустимим номером.

Команда або відповідь RR призначена для передачі повідомлення про готовність станції до приймання інформаційного кадру.

Команда або відповідь RNR повідомляє про те, що приймаюча станція не може прийняти інформаційні кадри. При цьому передача супервізорних кадрів не припиняється.

Команда або відповідь REJ використовується для вимоги повторної передачі інформаційних кадрів, починаючи з номера N(R).

Команда або відповідь SREJ використовується для вимоги повторної передачі тільки одного інформаційного кадру з номером N(R).

Станції HDLC:

- первинні станції – такі станції, які посилають команди, приймають відповіді і є відповідальними за відновлення помилок канального рівня;
- вторинні станції – такі станції, які приймають команди, посилають відповіді й можуть брати участь у діях з відновлення помилок;
- комбіновані станції – такі станції, які посилають як

команди, так і відповіді, а також приймають і команди й відповіді й так само є відповідальними за відновлення помилок канального рівня.

З'єднання первинної й вторинної станцій через канал передачі утворює незбалансовану двоточкову або багатоточкову конфігурацію. Ці станції можуть працювати в режимі нормальних відповідей (NRM) або в режимі асинхронних відповідей (ARM).

Збалансовані двоточкові конфігурації можуть бути реалізовані одним зі способів:

- розмістивши на обох кінцях каналів одночасно первинну й вторинну станції, можна одержати симетричну процедуру шляхом накладення двох незбалансованих процедур;

- можна використовувати дві комбіновані станції. У цьому випадку станції повинні працювати в асинхронному балансовому режимі (ABM).

Режим нормальних відповідей (NRM)

Режим нормальних відповідей є робочим режимом, у якому вторинна станція може почати передачу тільки в результаті одержання явного дозволу на це від первинної станції. Після одержання дозволу вторинна станція починає передачу відповіді. Передача відповіді може включати один або кілька кадрів, що пересилаються протягом проміжку часу, поки канал підтримується в активному стані. Наприкінці передачі відповіді вторинна станція вказує останній кадр і припиняє передачу доти, поки не одержить знову явного підтвердження від первинної станції.

Цей режим забезпечує напівдуплексну передачу типу «опитування/швидка селекція» по двоточкових або багатоточкових каналах зв'язку. В основі режиму передачі лежить керування з боку ведучого (EOM) декількома веденими (терміналами), при цьому адресне поле кадру HDLC використовується при адресації до ведучих.

Біт опитування/закінчення (P/F) у керуючому полі кадру використовується ведучим для позначення процедури опитування, а веденим – для позначення останнього кадру передачі даних. Ведений запитує дані у ведомого, передаючи супервізорний кадр «готовий до приймання» (RR), у якому біт опитування/закінчення встановлений в «1», а в адресному полі розміщена адреса веденого. Ведений передає дані ведучому в інформаційних кадрах і позначає останній кадр передачі, устанавлюючи біт «закінчення» у цьому самому кадрі в значення «1».

Свої дані ведучий передає веденому в інформаційних кадрах, в адресному полі яких розміщена адреса веденого. Останній інформаційний кадр ведучий позначає, устанавлюючи біт «закінчення» у значення «1» у керуючому полі.

Режим асинхронних відповідей (ARM)

ARM є робочим режимом, у якому вторинна станція робить передачу без одержання явного дозволу від первинної станції. Така синхронна передача може включати один або багато кадрів і служить для пересилання інформаційного поля й/або повідомлень про зміну стану вторинної станції (наприклад, номера наступного очікуваного кадру; перехід зі стану “вільно” у стан “зайняте” і навпаки; виникнення особливих станів).

Цей режим забезпечує дуплексну передачу по дуплексному двоточковому каналу. Кожне закінчення може розглядатися як таке, що має первинну станцію й/або вторинну станцію.

Асинхронний балансовий режим (AB)

AB є робочим режимом збалансованої конфігурації, у якому комбінована станція може посилати команди в будь-який час і може робити передачу кадрів без одержання дозволу від іншої комбінованої станції. Команди передаються з адресою віддаленої станції, у той час як відповіді - з адресою місцевої станції.

Цей режим забезпечує дуплексну передачу по дуплексному двокрапковому каналу. Кожне закінчення каналу є комбінованою (первинною/вторинною) станцією [4].

1.4 Принципи системного підходу до проектування СПДП

Системний підхід – це облік усього, що впливає на виконання системою своїх завдань і досягнення поставлених цілей. При цьому сама мета функціонування системи й вирішування нею завдання повинні бути сформульовані з урахуванням впливу на інші системи й у першу чергу на систему більш високого ієрархічного рівня, частиною якої її можна розглядати.

Методологічно можна виділити такі принципи системного підходу до проектування:

1 Складну ієрархічну систему можна декомпонувати на ряд підсистем і проектувати кожен з них. Однак оптимізація підсистем не забезпечує, у загальному випадку, оптимальності всієї системи. Тому система повинна оптимізуватися в цілому, як єдиний об'єкт із заданим цільовим призначенням. При цьому можливі рішення, що забезпечують максимум ефективності всієї системи за рахунок погіршення ефективності інших підсистем.

2 Повинні бути розглянуті й проаналізовані всі альтернативні варіанти структури системи й обрані ті, які найбільш повно відповідають пропонованим вимогам.

3 Вибір найкращого варіанта повинен ґрунтуватися на кількісній оцінці ефективності й необхідних витрат на реалізацію. Для цього необхідно використовувати кількісні показники ефективності, названі критеріями. Якщо критерій поданий у вигляді функції параметрів, що оптимізуються, то він називається цільовою функцією.

4 Процес проектування системи носить ітеративний характер, на кожному етапі якого з урахуванням накопиченої інформації шукається рішення більш досконале

ніж попереднє.

Проектування поділиться на дві яскраво виражені стадії: системне проектування й технічного проектування.

На стадії системного проектування визначаються цілі, критерії, моделі системи в цілому. Основним предметом, що підлягає розробленню, є структура (архітектура) системи – сукупність елементів і зв'язків між ними.

На стадії технічного проектування розробляються окремі елементи системи відповідно до обраної структури й алгоритму функціонування.

Послідовність і взаємозв'язок етапів проектування при системному підході показана на рисунку 1.6.

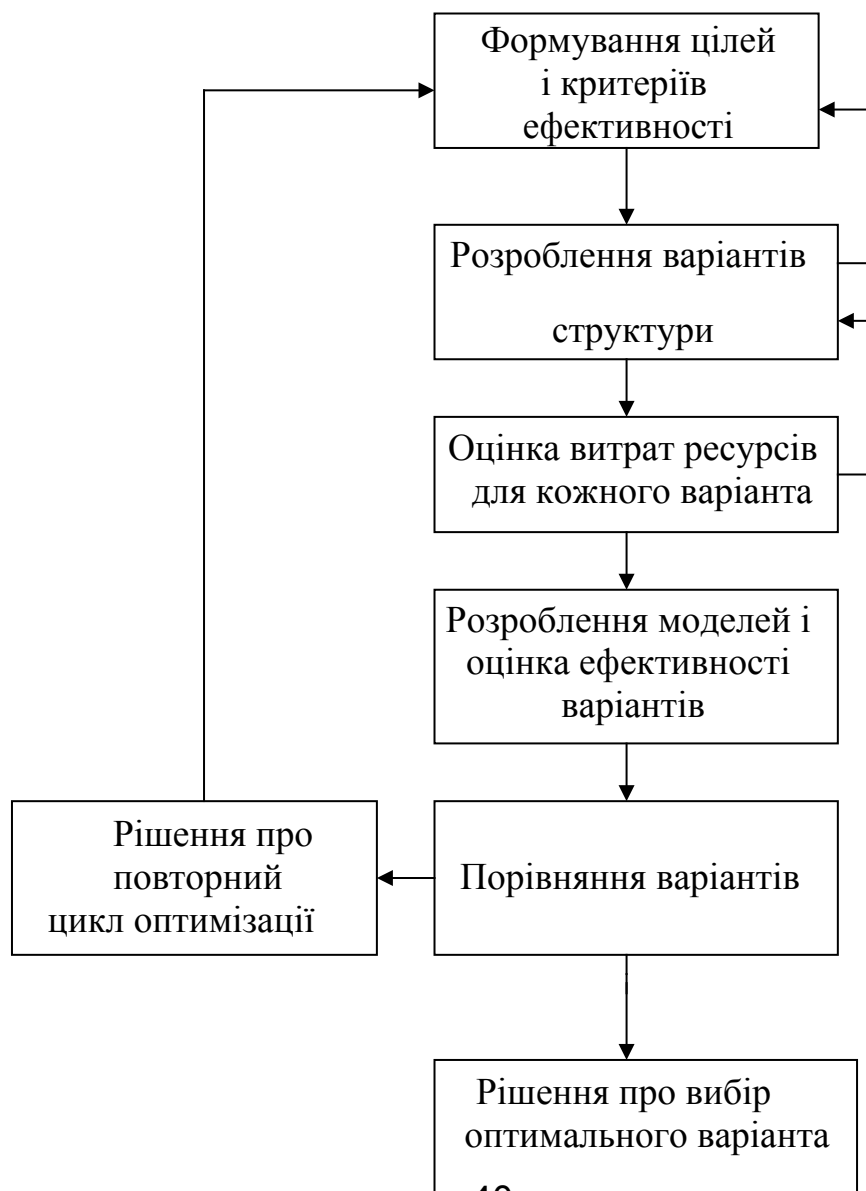


Рисунок 1.6 - Послідовність і взаємозв'язок етапів проектування

Результати системного проектування визначають цілі й критерії ефективності стадії технічного проектування.

Істотною особливістю проектування СПДП, що використовує засоби обчислювальної техніки, є необхідність розподілу функцій, що виконує система між апаратними й програмними засобами на стадії системного проектування. Співвідношення між апаратними й програмними засобами істотно впливає на оптимальність структури системи, ефективність її функціонування й вартість розроблення й експлуатації.

1.5 Обґрунтування вимог до СПДП і критеріїв ефективності

Основною метою СПДП є обробка й передача дискретних повідомлень заданих обсягів по каналах зв'язку із забезпеченням необхідні швидкодії, правильності передачі й надійності.

Ефективною є система, яка у заданих умовах експлуатації виконує поставлені перед нею завдання, а витрати на її створення й експлуатацію менше витрат, одержуваних у результаті її використання.

Кількісна оцінка повинна досить повно характеризувати систему в цілому, мати гнучкість і універсальність, бути конструктивною при аналізі й синтезі системи, відрізнятися достатньою простотою обчислення й використання, мати ясний фізичний зміст.

Важливою властивістю оцінки є її гнучкість і універсальність. Кожна конкретна система зв'язку вирішує певні функціональні завдання на відповідному рівні ієрархії, що призводить до необхідності застосування різних показників. Форма критерію ефективності повинна мати

можливість охопити всі істотні показники системи, число й зміст яких заздалегідь не визначено й заповняться конкретним змістом при конкретному використанні.

Для успішного вирішення завдання синтезу й аналізу системи необхідно, щоб критерій ефективності залежав від параметрів системи. У ролі показників ефективності можуть виступати різні параметри. У таблиці 1.11 наведена класифікація параметрів і показників стосовно СПДП [2].

Досить простою і в той же час гнучкою і універсальною може бути оцінка, заснована на ваговому підсумовуванні параметрів системи:

$$\vartheta = \sum_{n=1}^N C_n \alpha_n ,$$

де N - число параметрів, що враховуються;

C_n - вагові коефіцієнти;

α_n - параметри.

Недоліком такої оцінки є деяка частка свободи при виборі вагових коефіцієнтів.

Існують і інші підходи до формування узагальнених оцінок ефективності [2, 3].

2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ ВІД ПОМИЛОК

2.1 Вибір варіанта структури й алгоритму обміну повідомленнями

Забезпечення заданих вимог з правильності й швидкості передачі по каналах з завадами може бути досягнуто побудовою СПДП із використанням структурної й інформаційної надмірності.

Структурна надмірність припускає використання

декількох каналів для передачі повідомлень, а інформаційна - використання завадостійкого кодування.

Оскільки стан каналу зв'язку змінюється в часі й конкретний характер потоку помилок на кожному окремому відрізку часу невідомий, необхідно, залежно від стану каналу, мати можливість змінювати внесену інформаційну надмірність, збільшуючи її зі зростанням ймовірності помилки й зменшуючи зі зниженням ймовірності помилки. У зв'язку з тим, що надмірність вноситься на передавальному кінці, а про стан каналу можна судити за результатами приймання повідомлення, то для вирішення завдання регулювання інформаційної надмірності вводиться структурна надмірність – додатковий канал, за допомогою якого передавальний кінець інформується про поточний стан каналу.

СПДП, що використовують зворотний канал, називаються системами зі зворотним зв'язком. Найбільшого поширення серед численних алгоритмів роботи систем зі зворотним зв'язком одержали системи з вирішальним зворотним зв'язком з очікуванням (ВЗЗ - ОЧ), з безперервною передачею й блокуванням (ВЗЗ - НП_{Бл}) і з адресним перезапитом (ВЗЗ - АП).

2.2 Система з вирішальним зворотним зв'язком з очікуванням (ВЗЗ - ОЧ)

Структурна схема системи наведена на рисунку 2.1, а алгоритм роботи - на рисунку 2.2.

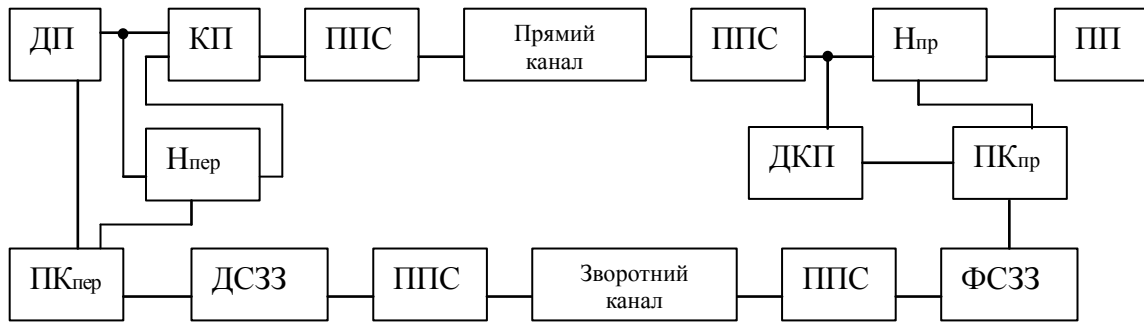


Рисунок 2.1 - Структурна схема з ВЗЗ - ОЧ

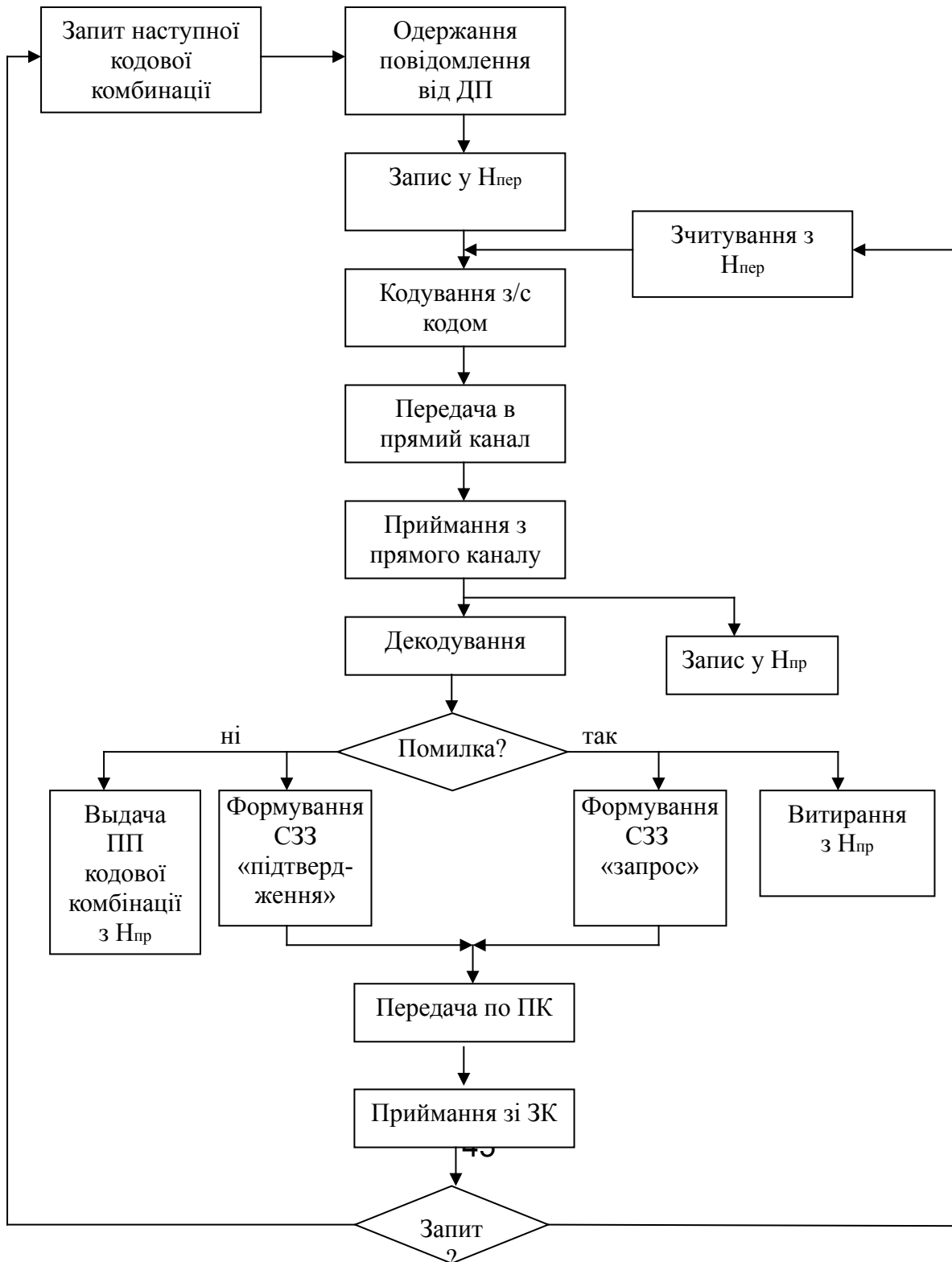


Рисунок 2.2 - Схема алгоритму роботи системи з ВЗЗ - ОЧ

По сигналу пристрою керування $ПК_{пер}$ джерело повідомлень ДП видає одну інформаційну кодову комбінацію, що надходить у накопичувач передачі $H_{пер}$ і пристрій КП, що кодує. У пристрої, що кодує, здійснюється кодування завадостійким кодом, після чого кодова комбінація, пройшовши через пристрій перетворення сигналу ППС, попадає в прямий канал Пр.к. На приймальному кінці після зворотного перетворення в ППС інформаційна частина кодової комбінації записується в накопичувач приймання $H_{пр}$ і одночасно вся кодова комбінація надходить у декодувальний пристрій ДКП, за допомогою якого виявляється наявність помилок. Прийняті кодові комбінації можуть бути прийняті без помилок, з невиявленими помилками й з виявленими помилками. Ці події є випадковими і їхня ймовірність визначається станом каналу й завадостійким кодом, що використовувався. За відсутності помилки або її невиявленні $ПК_{пр}$ приймається рішення про видачу інформаційної кодової комбінації одержувачеві інформації ОП й формування й передачу по зворотному каналу ЗК сигналу зворотного зв'язку "підтвердження". Пройшовши по зворотному каналу, сигнал "підтвердження" розпізнається дешифратором сигналу зворотного зв'язку ДСЗЗ, за допомогою $ПК_{пер}$ запитується чергова інформаційна кодова комбінація й цикл повторюється.

Якщо в прийнятій кодовій комбінації виявлена помилка, то $ПК_{пр}$ приймається рішення про стирання інформаційної кодової комбінації із $H_{пр}$ і посилення по зворотному каналу

сигналу зворотного зв'язку "запит". При прийманні зі зворотного каналу сигналу "запит" ПК_{пер} дає команду на повторну передачу інформаційної кодової комбінації із Н_{пер}. Отже, інформація із Н_{пер} буде повторюватися доти, поки не прийде сигнал "підтвердження".

Сигнали "підтвердження" і "запит" при передачі по зворотному каналу внаслідок дії завад можуть трансформуватися один в інший. У випадку трансформації запиту на підтвердження на приймальному кінці не буде отримана кодова комбінація, а у випадку трансформації підтвердження в запит кодова комбінація буде отримана двічі. Такі події називаються "випаданням" і "вставкою" відповідно або, у загальному випадку, зсувами й оцінюються ймовірностями $P_{\text{вип}}$, $P_{\text{вст}}$ і $P_{\text{зсв}} = P_{\text{вип}} + P_{\text{вст}}$.

Для виключення таких явищ застосовують циклічну нумерацію переданих комбінацій.

2.3 Система з вирішальним зворотним зв'язком з безперервною передачею й блокуванням (ВЗЗ-БП_{Бл})

Структурна схема напівдуплексної системи з ВЗЗ-НП_{Бл} аналогічна схемі системи з ВЗЗ-ОЧ. Відмінність полягає в тому, що Н_{пер} розраховано не на одну кодову комбінацію, а на декілька. Алгоритм роботи системи наведений на рисунку 2.3.

У цій системі ДП видає безперервну послідовність інформаційних кодових комбінацій, не очікуючи сигналу підтвердження або запиту. Однак передані інформаційні кодові комбінації зберігаються в Н_{пер} до приймання сигналів по зворотному каналу.

Якщо на приймальному кінці кодова комбінація прийнята правильно або з невиявленою помилкою, інформаційні символи передаються із Н_{пр} до ПП. При виявленні в прийнятій кодовій комбінації помилки ПК_{пр} робить блокування входу приймача, стирає в Н_{пр} прийняту

інформаційну кодову комбінацію й посиляє по зворотному каналу сигнал "запит". Після приймання сигналу "запит" передавальна станція повторює не одну (як у системі з ВЗЗ-ОЧ), а кілька кодових комбінацій, тому що поки поширювався сигнал по зворотному каналу, передавач передавав, а приймач був заблокований. Оцінка кількості повторно переданих кодових комбінацій і ємність $N_{\text{пер}}$ буде проведена пізніше.

EMBED

Visio.Drawing.11

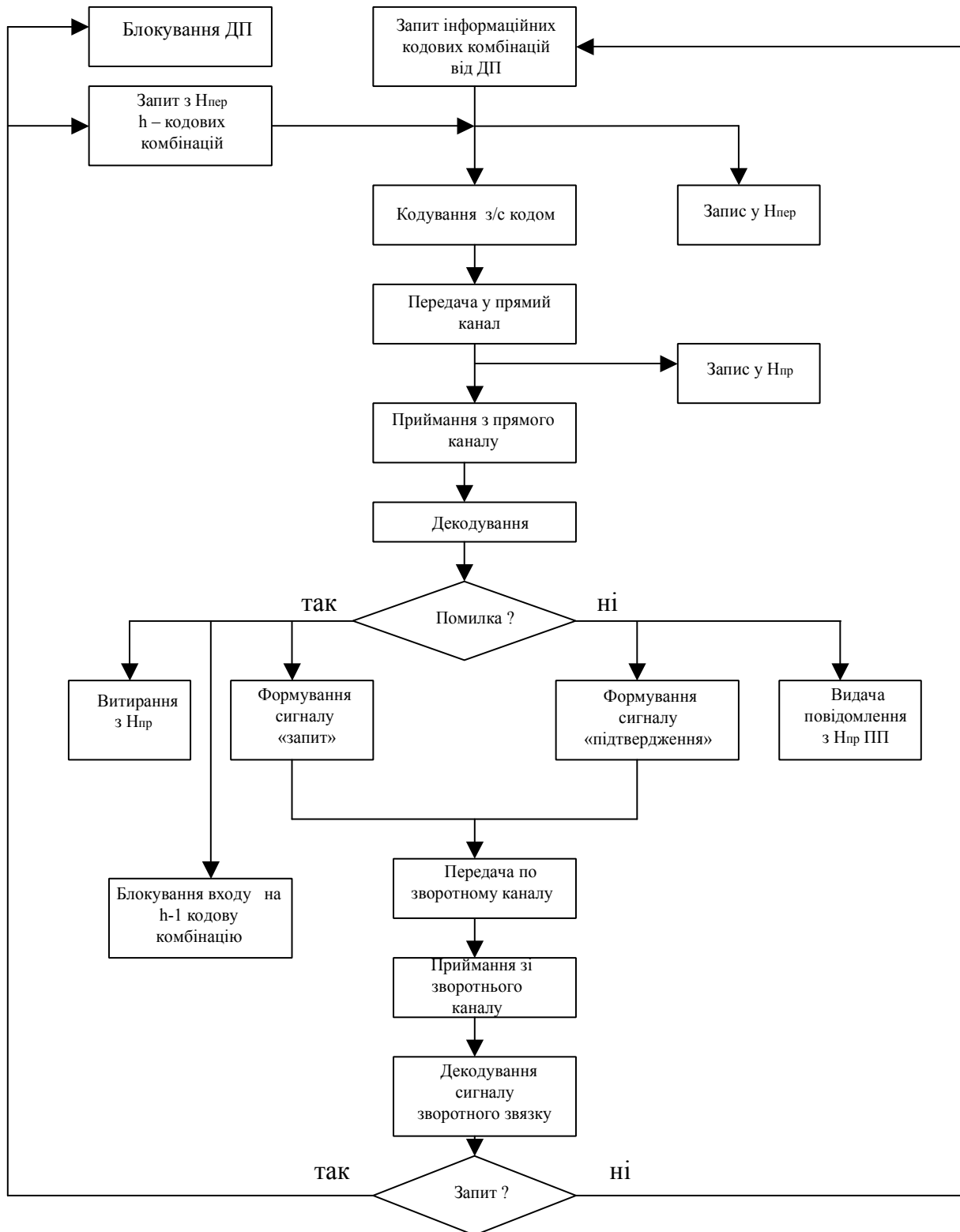


Рисунок 2.3 - Схема алгоритму V33 – БП_{БЛ}

2.4 Система з вирішальним зворотним зв'язком з адресним перезапиту (V33-АП)

У цих системах передача здійснюється блоками кодових комбінацій і в приймачі є пам'ять на весь блок з окремими комірками для кожної кодової комбінації. Приймач системи виробляє сигнал запиту адрес кодових комбінацій, у яких при прийманні виявлені помилки, а передавач повторює тільки запитані кодові комбінації.

Структурна схема системи наведена на рисунку 2.4, а алгоритм роботи – на рисунку 2.5.

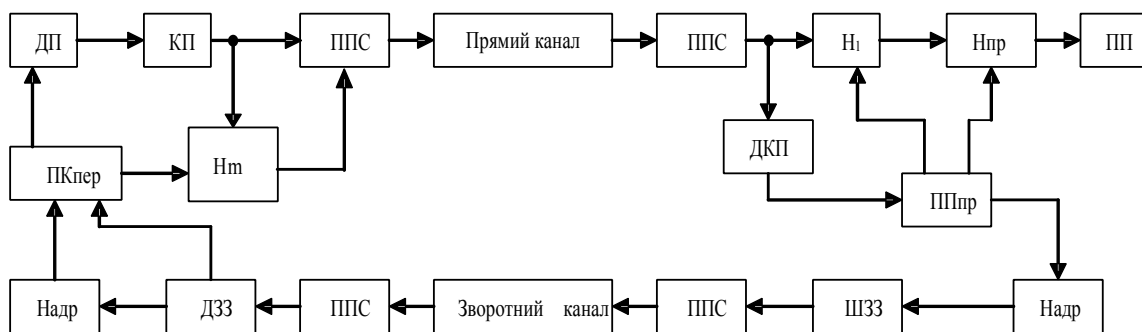


Рисунок 2.4 - Структурна схема системи з В33 – АП

По сигналі запиту від $ПК_{пер}$ повідомлення від ДП надходить блоком з i кодових комбінацій. Повідомлення кодується завадостійким кодом, записується в накопичувач N_m і відправляється в прямий канал. Прийняте по прямому каналу повідомлення записується за однією кодовою комбінацією в накопичувач N_1 і декодується в ДКП. Якщо помилка не виявлена, то кодова комбінація записується в накопичувач $N_{пр}$ в комірку, номер якої відповідає номеру кодової комбінації в повідомленні. Якщо фіксується наявність помилки, то $ПК_{пр}$ стирає з N_1 кодову комбінацію й відповідну комірку у $N_{пр}$ залишається порожнім. Номера комбінацій, прийнятих з помилками, запам'ятовуються в накопичувачі $N_{адр}$. Після закінчення приймання всього блока кодових комбінацій, адреси неправильно прийнятих через шифратор сигналу зворотного зв'язку ШЗЗ передаються по зворотному каналу. Прийняті зі зворотного каналу адреси записуються в накопичувач адрес $N_{адр}$. Далі під керуванням

$PK_{пер}$ згідно із цими адресами з H_m зчитуються кодові комбінації й передаються по прямому каналу. Прийняті адреси порівнюються з адресами кодових комбінацій, у яких були виявлені помилки, а повторювані кодові комбінації знову перевіряються на наявність помилок. Якщо виявляються помилки або неправильні адреси, то процес перезапиту повторюється. Якщо все прийнято правильно, то кодові комбінації записуються у відповідні комірки $H_{пр}$, а $PK_{пр}$ формує сигнал "підтвердження". Одержавши сигнал "підтвердження", $PK_{пер}$ дозволяє ДП видати черговий блок інформаційних кодових комбінацій і стирає попередній блок з H_m .

2.5 Аналіз характеристик систем зі зворотними зв'язками

Для оцінки систем зі зворотним зв'язком використовується ряд параметрів, що характеризують правильність передачі повідомлень, швидкість передачі, коефіцієнт використання каналів, затримку видачі повідомлень одержувачеві й зсуви в прийнятому повідомленні.

Правильність передачі повідомлень оцінюється ймовірністю видачі одержувачеві даних помилкової комбінації первинного m -елементного коду $P_{пом}(m)$ і ймовірністю видачі одержувачеві помилкового k -елементного блока даних $P_{пом}(k)$. Необхідність введення двох параметрів обумовлена тим, що m -елементні комбінації, які відповідають окремим знакам повідомлення, поєднують у блоки, що містять k елементів ($k > m$). Комбінації надлишкового (n, k) коду складаються з k інформаційних елементів і $n - k = r$ перевірочних. Об'єднання знаків у блоки збільшує загальну кількість елементів у комбінації n , що, як буде показано нижче, призводить до збільшення швидкості передачі.

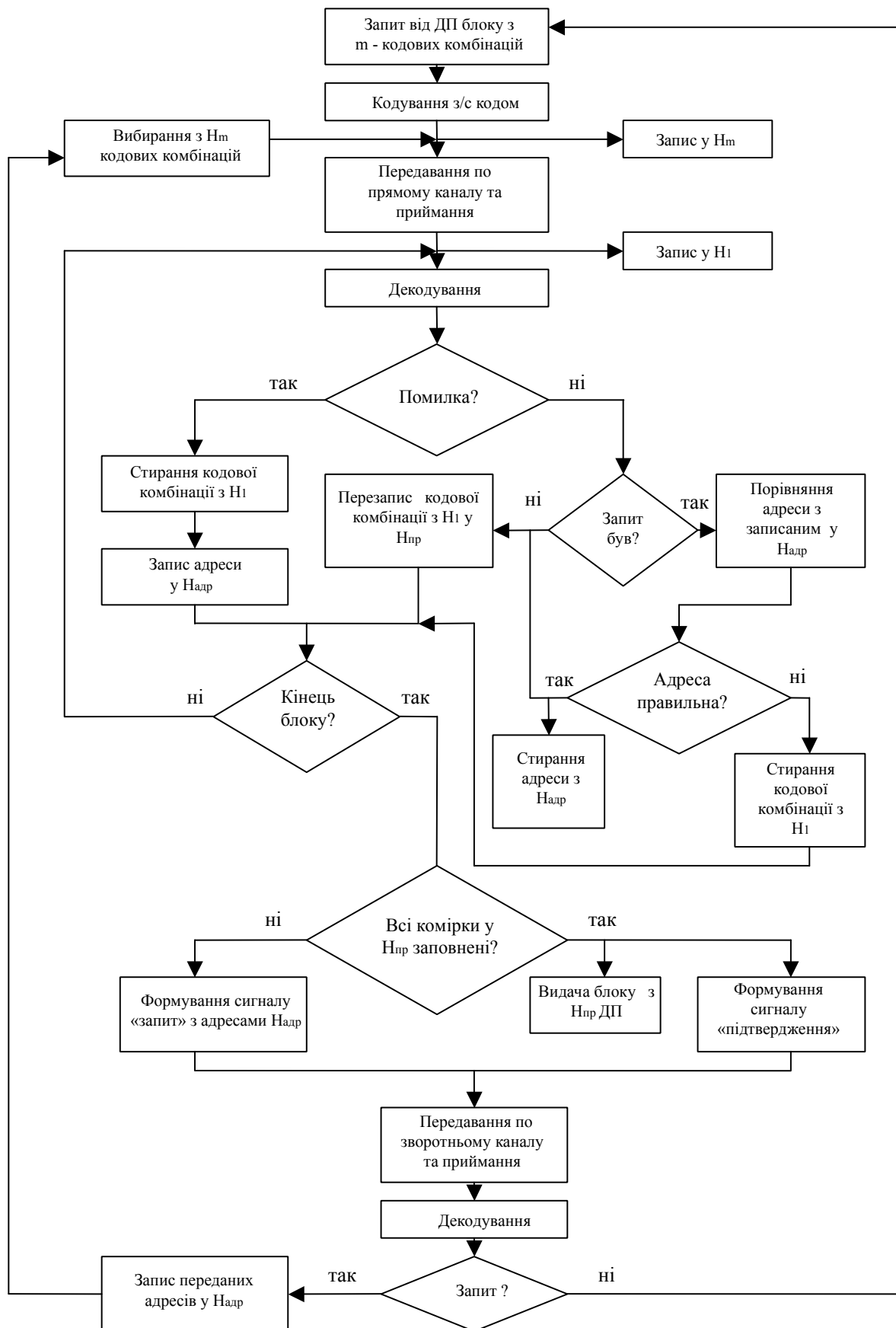


Рисунок 2.5 - Схема алгоритму роботи системи з ВЗЗ - АП
Із двох зазначених параметрів основним з погляду одержувача є параметр $P_{\text{ном}}(m)$.

Швидкість передачі в системах зі зворотним зв'язком прийнято оцінювати декількома параметрами: поточною швидкістю передачі інформації $R_{\text{п}}$, ефективною швидкістю передачі $R_{\text{Е}}$ й відносною ефективною швидкістю передачі R .

Поточна швидкість передачі визначається як добуток швидкості модуляції на відношення числа двійкових символів, виданих з виходу системи ОП за час T , до значення T , і є випадковою функцією часу внаслідок зміни умов передачі, що мають випадковий характер. Ефективна швидкість передачі дорівнює математичному очікуванню величини $R_{\text{п}}$, тобто має сенс середньої швидкості передачі. Відносна ефективна швидкість передачі визначається відношенням

$$R = \frac{R_{\text{Е}}}{B_1},$$

де B_1 - швидкість модуляції в прямому каналі.

Для оцінки ефективності використання прямого й зворотного каналу служить коефіцієнт використання каналів. Якщо передача інформації здійснюється тільки по прямому каналу (напівдуплексна передача), $K_{\text{вик}}$ визначається таким виразом:

$$K_{\text{вик}} = \frac{RB_1}{B_1 + B_2},$$

де B_2 - швидкість модуляції у зворотному каналі.

Якщо ж обидва канали використовуються для передачі повідомлень (дуплексна передача) з відносними ефективними швидкостями відповідно R_1 і R_2 , то

$$K_{\text{вик}} = \frac{R_1 B_1 + R_2 B_2}{B_1 + B_2}.$$

Затримка у видачі повідомлень одержувачеві є випадковою, тому що визначається кількістю перезапитів стертих кодових комбінацій. Тому для оцінки використовується функція розподілу часу затримки $F_m(t)$, що дорівнює ймовірності затримки m -елементної комбінації в каналі на час менше t , тобто

$$F_m(t) = p(t_m < t).$$

Оскільки вираз для $F_m(t)$ одержати досить складно, то для оцінки затримки можна скористатися оцінкою середнього числа переданих блоків даних на один прийнятий M_1 . Різниця $(M_1 - 1)$ визначає середню кількість повторень блока даних, що дозволяє оцінити середній час затримки.

Зсуви, як вказувалося раніше, оцінюються ймовірністю "випадань" і "вставок".

Перераховані вище параметри залежать від алгоритму роботи системи й характеру потоку помилок у дискретному каналі.

2.5.1 Параметри системи з ВЗЗ-ОЧ

Ймовірність видачі одержувачеві помилкового блока даних, тобто блока даних з невиявленою помилкою $P_{\text{пом}}(k)$, може бути обчислена за формулою [3, 6]

$$P_{\text{пом}}(k) = \frac{P_{\text{ном}}(n)}{1 - P_{\text{ст}}(n)}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{ном}}(n)$ - ймовірність невиявленої помилки;

$P_{\text{ст}}(n)$ - ймовірність виявлення (стирання) прийнятих з помилкою кодових комбінацій n -елементного коду.

Поточна швидкість передачі **R** відповідно до алгоритму роботи системи й часової діаграми на рисунку 2,6 визначається таким виразом:

$$R = \frac{k}{n + t_{оч} / t_0} \frac{N_{пр}}{N_{пер}}, \quad (2.2)$$

- де $N_{пр}$ - число комбінацій виданих одержувачеві за час t ;
- $N_{пер}$ - число комбінацій переданих за час t ;
- $t_{оч} = 2t_p + t_{а кк} + t_{ос} + t_{а ос}$ - мінімальний час очікування сигналу зворотного зв'язку;
- t_0 - тривалість одиничного елемента сигналу.

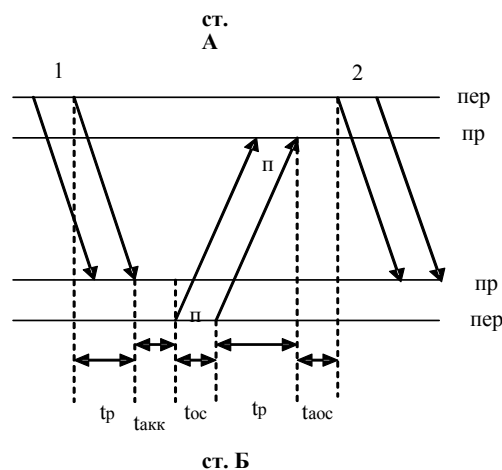


Рисунок 2.6 - Часова діаграма взаємодії двох станцій

При досить великому

інтервалі часу t відношення $N_{пр}/N_{пер}$ сходиться до величини ймовірності рішення про видачу інформації одержувачеві (ймовірності правильного приймання) $P_{п}(n) = 1 - P_{ст}(n)$. Отже, формулу (2.2) можна переписати так:

$$R = \frac{k}{n + t_{оч} / t_0} (1 - P_{ст}(n)). \quad (2.3)$$

Досить часто у реальних системах $t_{а кк}$ і $t_{а ос}$ значно менше за величиною тривалості сигналу зворотного зв'язку $t_{ос}$, тому можна вважати, що $t_{оч} \approx 2t_p + t_{ос}$.

Величини $t_p = L/v$, а $t_{ос} = n_{зз}/B_2$, де L - відстань між

кінцевими пунктами, v - швидкість поширення сигналу по фізичному каналу, $n_{зз}$ - довжина кодової комбінації сигналу зворотного зв'язку, V_2 - швидкість модуляції у зворотному каналі.

Середнє число переданих блоків даних на один прийнятий

$$M_1 = \frac{1}{1 - P_{CT}(n)}. \quad (2.4)$$

Вирази (2.3) і (2.4) записані для випадку, коли канал зворотного зв'язку ідеальний, тобто в ньому немає помилок. Для випадку неідеального каналу зворотного зв'язку формули для $P_{пом}(k)$, R і M_1 приймають такий вигляд [3]:

$$P_{пом}(k) = \frac{P_{ПOM}(n)}{1 - P_{CT}(n) \times P_{зз} - P_{П}(n) \times P_{зп}}, \quad (2.5)$$

$$R = \frac{k}{n + t_{Oч} / t_0} [1 - P_{CT}(n) \times P_{зз} - P_{П}(n) \times P_{зп}], \quad (2.6)$$

$$M_1 = \frac{1}{1 - P_{CT}(n) \times P_{зз} - P_{П}(n) \times P_{зп}}, \quad (2.7)$$

де $P_{зз}$ - імовірність одержання сигналу запиту при передачі сигналу запиту;

$P_{зп}$ - імовірність одержання сигналу запиту при передачі сигналу підтвердження.

Якщо вважати, що дискретний канал має симетрію, тобто ймовірність переходу "0" в "1" дорівнює ймовірності зворотного переходу, то ймовірності правильного й помилкового приймання сигналів у зворотному каналі дорівнюють відповідним ймовірностям у прямому каналі: $P_{зз} = P_{П}(n) = 1 - P_{CT}(n)$; $P_{зп} = P_{пз} = P_{пом}(n)$. З урахуванням цього вирази (2.5), (2.6), (2.7) без урахування малих складових можна подати так:

$$P_{\text{пом}}(\mathbf{k}) \approx \frac{P_{\text{ПОМ}}(n)}{1 - P_{\text{СТ}}(n) - P_{\text{ПОМ}}(n)}, \quad (2.8)$$

$$R \approx \frac{k}{n + \frac{t_{\text{оч}}}{t_0}} [1 - P_{\text{СТ}}(n) - P_{\text{ПОМ}}(n)], \quad (2.9)$$

$$M_1 \approx \frac{1}{1 - P_{\text{СТ}}(n) - P_{\text{ПОМ}}(n)}. \quad (2.10)$$

2.5.2 Параметри системи з ВЗЗ - БП_{БЛ}

При безперервній передачі за час між моментом виявлення помилки й приходом повтореної кодової комбінації буде прийнято ще h кодових комбінацій, які не будуть прийняті у зв'язку із блокуванням входу приймача. Тому для повторної передачі цих h кодових комбінацій ємність накопичувача $N_{\text{ПЕР}}$ повинна дорівнювати h :

$$h = 1 + [t_{\text{оч}} / nt_0],$$

де символ $[x]$ означає найменше ціле число, що більше або дорівнює x .

Поточна швидкість передачі дорівнює

$$R = \frac{k}{n} \frac{N_{\text{ПР}}}{N_{\text{ПЕР}}}.$$

При досить великому інтервалі часу t відношення $N_{\text{ПР}}/N_{\text{ПЕР}}$ у цьому випадку, зводиться до величини $[1 - P_{\text{СТ}}(n)] / [1 + P_{\text{СТ}}(n)(h - 1)]$ і, отже, значення поточної швидкості передачі буде дорівнювати

$$R = \frac{k}{n} \frac{[1 - P_{\text{СТ}}(n)]}{[1 + P_{\text{СТ}}(n)(h - 1)]}. \quad (2.11)$$

Ймовірність видачі одержувачеві помилкового блока даних $P_{\text{пом}}(\mathbf{k})$, як показано в роботі [6], визначається виразом

$$P_{\text{пом}}(\mathbf{k}) = P_{\text{пом}}(n) \left\{ 1 - (M_1 - 1) \left[\frac{P_{\text{пом.бл}}(n)}{P_{\text{пом}}(n)} \times \frac{h-1}{h} - 1 \right] \right\}, \quad (2.12)$$

де $M_1 = \frac{1 + P_{\text{ст}}(n)(h-1)}{1 - P_{\text{ст}}(n)}$,

$P_{\text{пом.бл}}(n)$ - імовірність появи комбінації з невиявленою помилкою серед комбінацій, прийнятих під час блокування.

Для випадку неідеального каналу зворотного зв'язку формули для R і M_1 набувають такого вигляду:

$$R = \frac{k}{n} \times \frac{|1 - P_{\text{ст}}(n)P_{\text{зз}} - P_{\text{п}}(n)P_{\text{зп}}|}{1 + |P_{\text{ст}}(n)P_{\text{зз}} + P_{\text{п}}(n)P_{\text{зп}}|(h-1)}, \quad (2.13)$$

$$M_1 = \frac{1 + |P_{\text{ст}}(n)P_{\text{зз}} - P_{\text{п}}(n)P_{\text{зп}}|(h-1)}{1 - P_{\text{ст}}(n)P_{\text{зз}} - P_{\text{п}}(n)P_{\text{зп}}}. \quad (2.14)$$

Для симетричного дискретного каналу

$$R = \frac{k}{n} \times \frac{|1 - P_{\text{ст}}(n) - P_{\text{пом}}(n)|}{1 + (P_{\text{ст}}(n) + P_{\text{пом}}(n))(h-1)}, \quad (2.15)$$

$$M_1 = \frac{1 + |P_{\text{ст}}(n) + P_{\text{пом}}(n)|(h-1)}{1 - P_{\text{ст}}(n) - P_{\text{пом}}(n)}. \quad (2.16)$$

2.5.3 Параметри системи з ВЗЗ – АП

Імовірність видачі одержувачеві помилкового блока даних $P_{\text{пом}}(\mathbf{k})$ при ідеальному зворотному каналі можна оцінити за формулою

$$P_{\text{пом}}(\mathbf{k}) = \frac{P_{\text{пом}}(n)}{1 - P_{\text{ст}}(n)}, \quad (2.17)$$

а поточну швидкість передачі

$$R = \frac{ki}{ni + \frac{t_{cp}}{t_0}}, \quad (2.18)$$

де t_{cp} - середній час, затрачуваний на перезапити й очікування сигналу підтвердження при передачі одного блока.

У випадку коли канал зворотного зв'язку з помилками

$$P_{пом}(k) = \frac{P_{пом}(n) + P_{ст}(n)(P_{пома}(n_A) + P_{пом}(n))}{1 - P_{ст}(n)}, \quad (2.19)$$

де $P_{пома}(n_A)$ - імовірність невиявленої помилки при прийманні адреси,

$$R = \frac{ki}{ni + \frac{P_{ст}(n)(n + n_A)}{(1 - P_{ст}(n))(1 - P_{ст}(n_A))}}, \quad (2.20)$$

де n_A - довжина кодової комбінації адреси;

$P_{ст}(n)$ - ймовірність виявлення помилки в адресі.

Імовірності $P_{пома}(n_A)$ і $P_{ст}(n)$ визначаються обраним способом адресації й передачі адрес.

2.5.4 Визначення параметрів систем з ВЗЗ із урахуванням статистичних характеристик каналів

Наведені вище формули показують, що правильність і швидкість передачі залежить не тільки від алгоритму роботи системи і параметрів завадостійкого коду, але й від характеру потоку помилок у дискретному каналі.

На цей час відомо багато різних моделей дискретних каналів [3]. Для конкретизації наведених вище формул

(2.1) - (2.20) розглянемо дві з них: канал з незалежними помилками й канал з логарифмічно лінійною щільністю помилок. У першому випадку канал зв'язку повністю характеризується одним параметром – імовірністю помилкового приймання символу повідомлення p_0 . За допомогою цього параметра відповідно до теореми Бернуллі, ймовірність появи в n -елементній комбінації рівно t помилок $P(t,n)$ визначається біноміальним розподілом

$$P(t,n) = C_n^t p_0^t (1 - p_0)^{n-t} \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq n. \quad (2.21)$$

З виразу (2.21) видно, що ймовірність приймання безпомилкової кодової комбінації ($t=0$) оцінюється виразом

$$P_{\Pi}(n) = P(0,n) = (1 - p_0)^n. \quad (2.22)$$

Ймовірність приймання помилкової кодової комбінації, тобто комбінації, що містить хоча б одну помилку, дорівнює

$$P_{\text{пом}}(n) = P(\geq 1, n) = 1 - P(0, n) = 1 - (1 - p_0)^n \approx n p_0. \quad (2.23)$$

Ймовірність появи q і більше помилок у комбінації довжиною n дорівнює

$$P(\geq q, n) = \sum_{t=q}^n C_n^t p_0^t (1 - p_0)^{n-t}. \quad (2.24)$$

Канал з логарифмічно лінійною щільністю помилок задається двома параметрами: імовірністю помилкового приймання одиничного символу p_0 і показником групування помилок α ($\alpha < 1$). Показник групування відбиває факт групування помилок у пакети (пачки). Під пакетом помилок розуміють відрізок послідовності символів, що починається й закінчується помилковими символами. У середині пакета можуть бути як правильно, так і неправильно прийняті, причому помилкові символи повинні розташовуватися один від одного не більш, ніж на r правильно прийнятих символів

(МККТТ рекомендував значення $r = 10$).

Для такої моделі каналу ймовірність появи m і більше помилок у комбінації довжиною n визначається виразом

$$P(\geq q, n) = \left(\frac{n}{q}\right)^{1-\alpha} p_0, \quad (2.25)$$

а ймовірність приймання помилкової кодової комбінації, тобто комбінації, що містить хоча б одну помилку, дорівнює

$$P_{\text{ош}}(n) = P(\geq 1, n) = n^{1-\alpha} p_0. \quad (2.26)$$

Якщо $\alpha = 0$, то пакетування помилок відсутнє, і помилки можна вважати незалежними. Найбільше значення α (0,5...0,7) відповідає електричним кабельним каналам, у радіорелейних від 0,3 до 0,5, у КХВ радіоканалах від 0,3 до 0,4.

У формули (2.1) - (2.20) входять величини $P_{\text{пом}}(n)$, $P_{\text{ст}}(n)$, $P_{\text{зз}}$, $P_{\text{зп}}$. Визначимо їх значення з урахуванням вищеописаних моделей дискретних каналів і застосування блокових систематичних завадостійких кодів.

Будемо вважати також, що канал зворотного зв'язку такий самий, як і прямий.

До формули (2.12) входить ймовірність $P_{\text{пом.бл}}(n)$, яку теоретично визначити досить складно, тому в [6] запропонована емпірична формула для обчислення $\frac{P_{\text{пом.бл}}(n)}{P_{\text{пом}}(n)}$, яка справедлива для значень $\alpha = 0,2 \dots 0,8$:

$$\frac{P_{\text{пом.бл}}(n)}{P_{\text{пом}}(n)} = \frac{1,4 + \alpha}{1 - \alpha}.$$

У таблиці 2.1 наведено вирази для визначення величин $P_{\text{пом}}(n)$, $P_{\text{ст}}(n)$, $P_{\text{зз}}$, $P_{\text{зп}}$, $P_{\text{пом.бл}}(n)$ для вищеописаних моделей дискретних каналів з помилками

Таблиця 2.1

Тип каналу з помилками	$P_{\text{ош}}(n)$	$P_{\text{ст}}(n)$	$P_{\text{зз}}$	$P_{\text{зп}}$	$P_{\text{пом}}(m)$
Канал з незалежним и помилками	$\frac{1}{2^{n-k}} \sum_{t=d}^n C_n^t p_0^t (1-p_0)^{n-t}$	np_0	$1 - P_{\text{ст}}(n)$	$P_{\text{пом}}(n)$	$P_{\text{пом}}(k) \times dm/n$
Канал з пакетами помилок	$\frac{1}{2^{n-k}} \left(\frac{n}{d}\right)^{1-\alpha} p_0$	$n^{1-\alpha} p_0$	$1 - P_{\text{ст}}(n)$	$P_{\text{пом}}(n)$	$P_{\text{пом}}(k) \times m^{1-\alpha} \left(\frac{d}{n}\right)^{1-\alpha}$

2.6 Визначення оптимальних параметрів завадостійкого коду

Як правило, до СПДП, що прекується, висуваються вимоги забезпечення заданої правильності передачі інформації при максимальній швидкості, для чого необхідно, щоб виконувалися умови

$$P_{\text{пом}}(m) \leq P_{\text{пом П}}(m), \quad (2.27)$$

де $P_{\text{пом П}}(m)$ - припустима ймовірність помилкового приймання m -елементної комбінації

$$i \quad R = R_{\text{макс}} . \quad (2.28)$$

Порядок вибору оптимального завадостійкого коду може бути такий.

1 Обчислюється $P_{\text{пом}}(m) = f(k/n)$ для кодів з різними значеннями k і n .

2 Для кожного значення n визначаються коди, що забезпечують виконання умови (2.27) і мають максимальне значення k/n .

3 Для кожного з обраних по п. 2 кодів за відповідними формулами визначається швидкість передачі R і будується графік залежності $R = \varphi(n)$.

4 За графіком $R = \varphi(n)$ вибирається код, що забезпечує

максимальну швидкість передачі. Цей код і буде оптимальним для конкретного варіанта системи при конкретних параметрах каналу зв'язку.

Якщо графік не має різко вираженого максимуму, не завжди варто вибирати оптимальний код. Іноді варто вибрати квазіоптимальний код, що забезпечує трохи меншу швидкість передачі, але зате дає можливість помітно спростити апаратуру.

У додатку А наведена коротка таблиця циклічних (n, k) кодів. Більш повна таблиця наведена в роботі [6].

2.7 Вибір виду вирішального зворотного зв'язку

Вид вирішального зворотного зв'язку визначається за критерієм (2.28) на підставі графічних розрахунків, що проведені у п. 4 порядку вибору оптимального завадостійкого коду, тобто такий варіант, у якого максимальне значення швидкості передачі. Якщо відмінність у швидкості не дуже значна, необхідно зіставити час затримки повідомлення, обумовлений середнім числом переданих блоків на один прийнятий, і складність технічної реалізації.

Необхідно також ураховувати, що в реальних системах швидкість передачі буде менше, ніж розрахована за вищенаведеними формулами, тому що в канал передаються ще службові розряди, які збільшать довжину кодової комбінації до $n_{\text{бл}} = n + n_{\text{сл}}$. Введення службових розрядів обумовлено необхідністю керування потоками даних при формуванні протоколів каналного рівня, що було розглянуто у розділі 1.

2.8 Розроблення алгоритму функціонування

пристрою захисту від помилок

Обрана структура системи передачі дискретних повідомлень і алгоритм обміну визначають алгоритм функціонування ПЗП, в основу якого може бути покладений який-небудь протокол каналного рівня. Алгоритм повинен визначати основні функції пристрою й послідовність їх виконання.

Складання алгоритму варто починати з визначення й взаємозв'язку основних завдань, що необхідно вирішити із наступною деталізацією можливих режимів роботи й ситуацій, що виникають у процесі обміну інформацією з ДП і передачею повідомлень по каналу зв'язку.

Наведемо перелік основних функцій, які є типовими для будь-яких ПЗП.

Початкове устанавлення блоків ПЗП: прийом, перетворення й контроль повідомлень, що надходять від джерела на передавальному кінці й видача їх одержувачеві на приймальному кінці; обмін керуючими сигналами між відправником і одержувачем; фазування; формування службових символів початку й кінця кадру, номера кадру, "підтвердження", "запит", "стирання" та ін.; підрахунок числа символів у кадрі; здійснення стафінгу; перевірка відповідності черговості надходження кадрів на прийомному кінці; кодування й декодування повідомлень; зберігання інформаційних блоків у накопичувачі на передавальному і прийомному кінцях до ухвалення рішення про правильність їхнього приймання; формування сигналів аварійної ситуації і їхня індикація; індикація стану апаратури. При відображенні стану апаратури доцільно виконувати індикацію таких ситуацій: вмикання живлення, підключення до каналу, виклик, передача, приймання, очікування, нема несучої, помилка периферійного пристрою, рівень сигналу. Залежно від конкретного типу пристрою перелік функцій може бути доповнений і/або деякі функції можуть бути виключені.

Очевидно, що для реалізації цих функцій в ПЗП з

"твердою логікою" повинні бути передбачені відповідні блоки, а в ПЗП, який програмується, - відповідні підпрограми. На рисунках 2.7 і 2.8 наведені схеми укрупнених алгоритмів передавальної й прийомної частини функціонування ПЗП з вирішальним зворотним зв'язком з очікуванням і маркерним способом фазування.

У вихідному стані передавальна й приймальна частини ПЗП перебувають у стані очікування. При надходженні запиту на передачу від джерела інформації ПЗП обмінюється керуючими сигналами з КОД і ППС відповідно до технічних вимог на стандартний стик. Після визначення, що КОД, ППС і ПЗП готові до передачі, вибирається режим обміну й через ППС у канал зв'язку передається службовий кадр установа зв'язку. При одержанні від ППС приймального кінця кадру «підтвердження» приймається рішення, що з'єднання в пропонованому режимі встановлене й можна здійснювати передачу даних.

Якщо апаратура не готова до процесу передачі, то включається сигналізація «аварія» і апаратура перемикається в режим переустановлення вихідних даних.

Після встановлення з'єднання здійснюється формування інформаційного кадру, що складається з визначення перевірочних символів за рахунок кодування завадостійким кодом, присвоєння поточного номера, утворення кодових комбінацій початку й кінця кадру. Сформований інформаційний кадр записується в накопичувач і передається в ППС. Наприкінці передачі кожного кадру запитується стан аналізатора каналу зворотного зв'язку. Якщо канал працездатний і наявний сигнал «підтвердження», то здійснюється передача наступних інформаційних кадрів. Якщо ж прийнятий по зворотному каналу сигнал «запит», то здійснюється повторна передача з накопичувача. Якщо число повторів обмежене, то при перевищенні числа повторів того самого кадру ПЗП перемикається в режим «аварія».

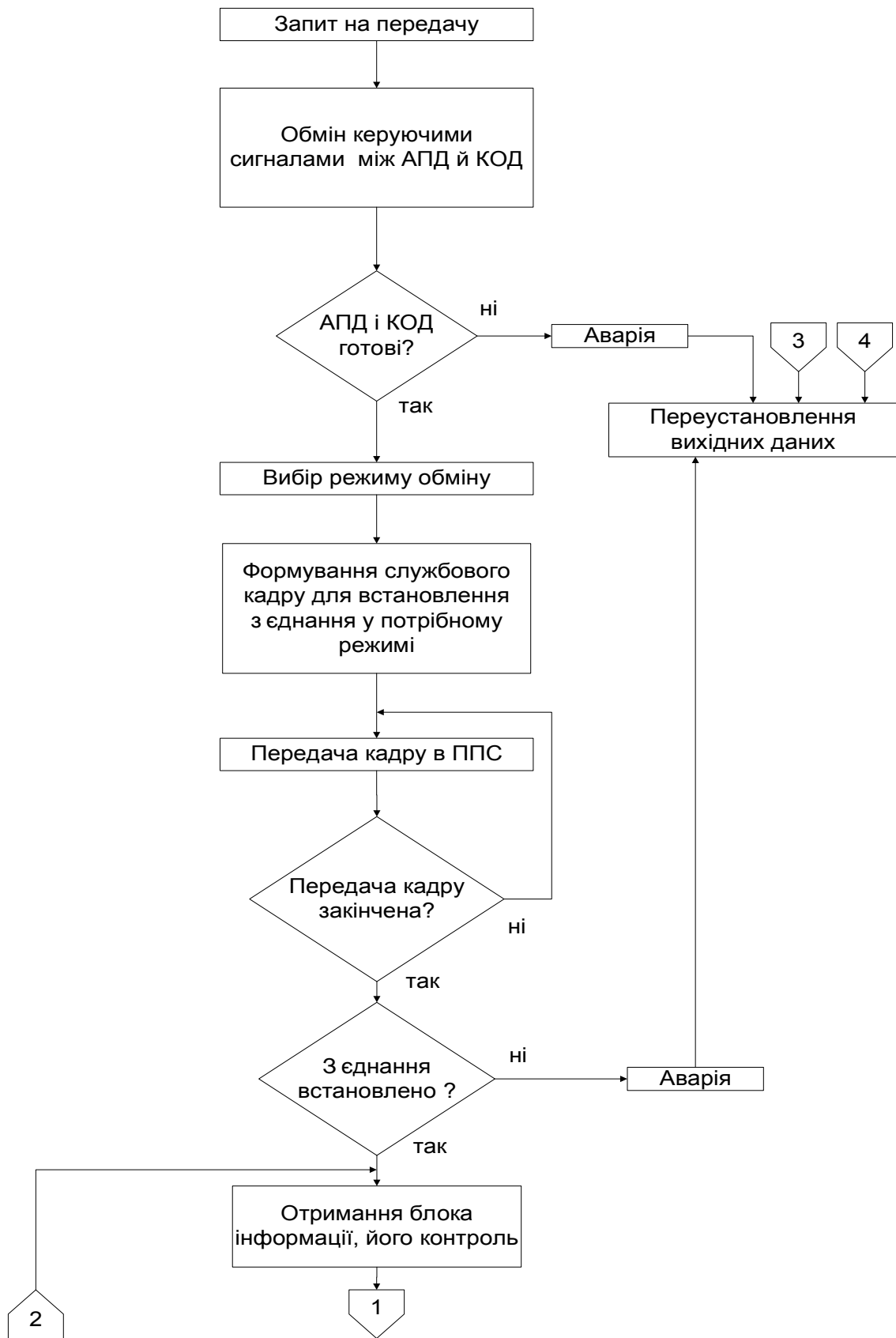


Рисунок 2.7 - Схема алгоритму функціонування передавальної частини ПЗП (початок)

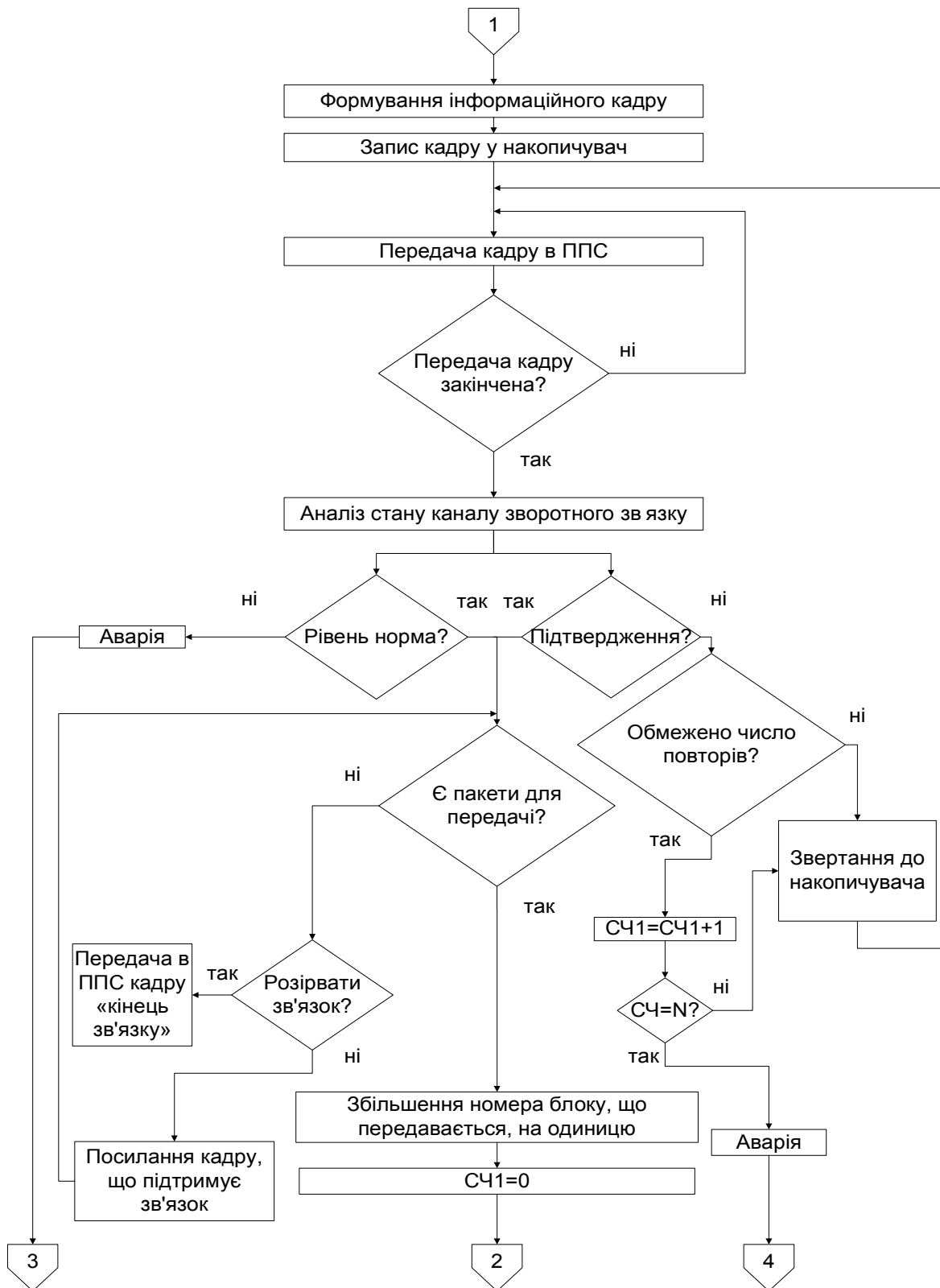


Рисунок 2.7 - Схема алгоритму функціонування передавальної частини ПЗП (закінчення)

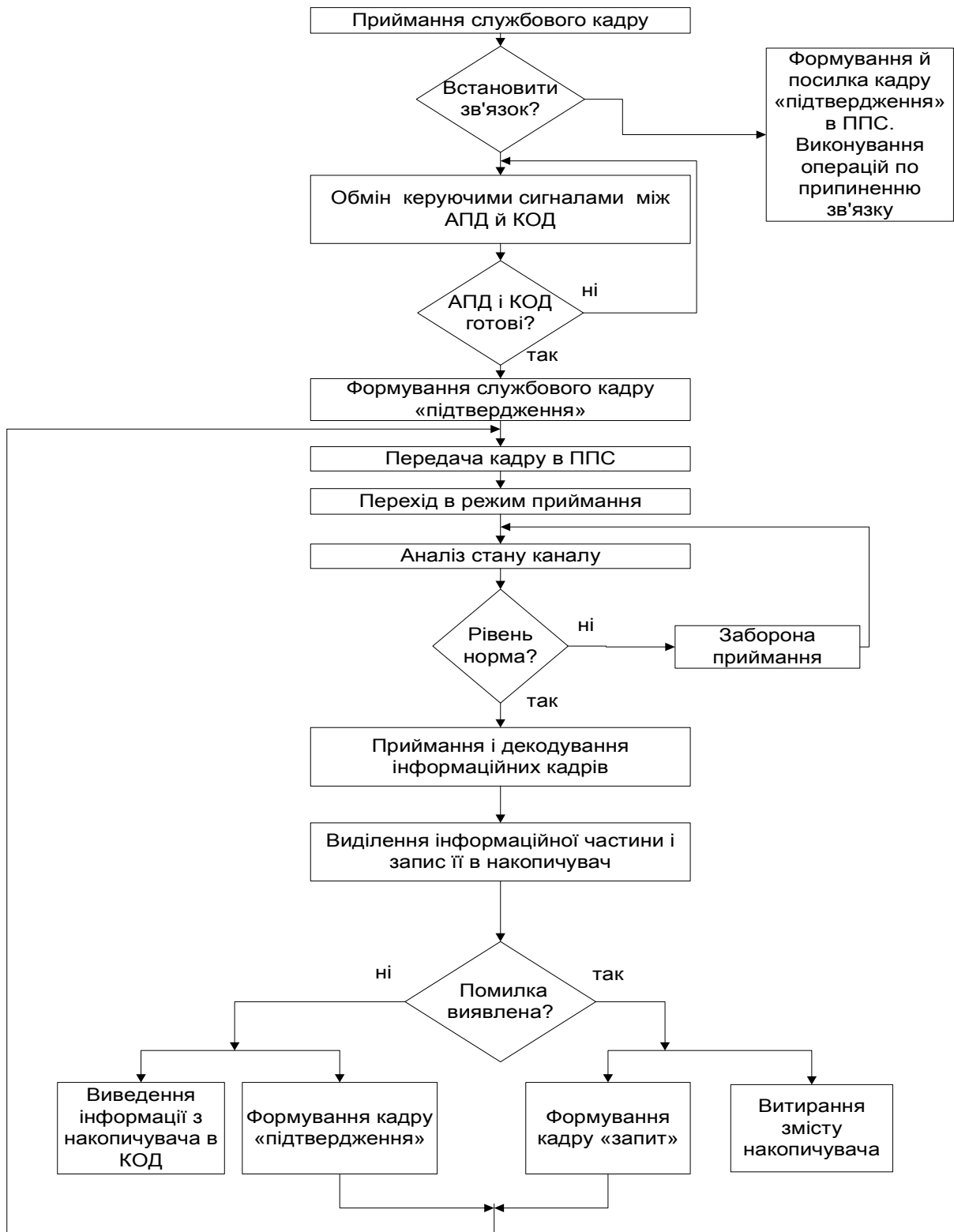


Рисунок 2.8 - Схема алгоритму роботи приймальної частини ПЗП

На прийомному кінці, після виявлення службового кадру встановлення зв'язку в пропонованому режимі, ПЗП обмінюється керуючими сигналами з КОД і ППС відповідно до технічних вимог на стандартний стик. Після визначення, що КОД, ППС і ПЗП готові до роботи в відповідному режимі, через ППС у канал зв'язку передається службовий кадр «підтвердження» і ПЗП переходить у режим приймання інформаційних кадрів. У режимі прийому інформаційних кадрів здійснюється перевірка їх на наявність помилок. Якщо помилка не виявлена, то по зворотному каналу посилається кадр «підтвердження», а якщо помилка виявлена, то посилається кадр «запит».

При апаратній реалізації на підставі розробленого алгоритму складається структурна схема ПЗП, що являє собою сукупність основних блоків, які реалізують задані функції й зв'язки між ними. Структурну схему варто розробляти досить докладно, щоб за нею можна було побудувати функціональну електричну схему окремих вузлів і технічний опис їхньої роботи.

Структурна схема повинна супроводжуватися технічним описом, у якому вказується склад і призначення блоків, зображених на структурній схемі, описуються їхні функції й взаємодія у всіх режимах роботи.

У процесі проектування пристрою захисту від помилок рекомендується дотримуватися такої послідовності дій.

З урахуванням вищевикладених рекомендацій в п. 2.6 скласти алгоритм вибору вирішального зворотного зв'язку й, реалізувавши його на ЕОМ, прийняти рішення, який вид зворотного зв'язку забезпечує виконання вимог зазначених у завданні на проектування.

Використовуючи відомості, що наведені у додатку А, визначити утворюючий багаточлен циклічного коду.

Розробити формат повідомлення, що передається, уточнивши кількість службових та інформаційних символів.

Розробити укрупнену структурну схему ПЗП й детальну функціональну схему кодека або алгоритм його програмної реалізації. Навести технічний опис її роботи.

3 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ

Основними завданнями пристрою перетворення сигналів (ППС) є узгодження дискретного сигналу з параметрами аналогового або цифрового каналу й передача дискретних сигналів по каналу зв'язку з необхідною швидкістю R і ймовірністю помилки p_0 . Ці завдання вирішуються використанням різних методів модуляції.

При передачі по аналогових каналах застосовуються такі види модуляції гармонічної несучої: ампліудна (АМ), частотна (ЧМ), відносна фазова (ВФМ) і квадратурно-ампліудна (КАМ) [1, 3]. Найбільшу питому швидкість передачі інформації дозволяє забезпечити КАМ, тому будемо розглядати проектування ППС на основі використання КАМ.

Аналітично сигнали з КАМ описуються виразом

$$S_i(t) = \begin{cases} C_i \sin(\omega t + \varphi_i) = a_i \sin \omega t + b_i \cos \omega t, & \text{при } 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & \text{при } t \notin [0, t_0], \end{cases} \quad (3.1)$$

де $C_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$, $\varphi_i = \arctg \frac{b_i}{a_i}$;

$i = 1, 2, 3 \dots m$ – позиційність модуляції (при $m = 2$ сигнали двійкові, при $m > 2$ – багатопозиційні);
 a_i і b_i – коефіцієнти, які можуть приймати різні значення, наприклад, 0; ± 1 ; ± 3 ; ± 5 .

Сигнали з КАМ зручно зображувати векторами у двовимірному просторі на площині, утвореній синфазною $U_x = a_i$ і квадратурною $U_y = b_i$ осями, поверненими одна відносно одної на 90° (що перебувають у квадратурі). Відзначаючи тільки кінці векторів, одержують зображення сигналу у вигляді сигнальної крапки, координати якої визначаються значеннями a_i і b_i . Сукупність сигнальних

точок утворить так зване сигнальне сузір'я. На рисунку 3.1 наведено сигнальний простір для випадку $m = 16$, коли $a_i = \pm 1; \pm 3$ і $b_i = \pm 1; \pm 3$.

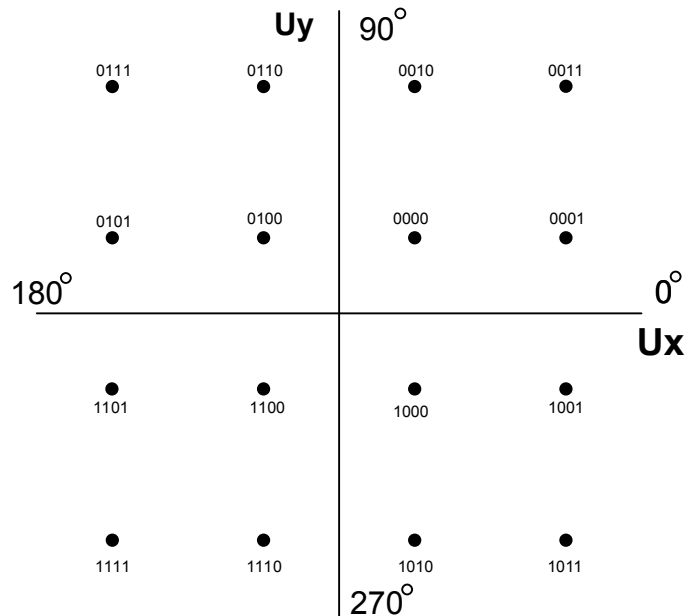


Рисунок 3.1

Одиничні елементи сигналу є відрізками синусоїд тривалістю t_0 , що відрізняються амплітудами й фазами.

Структурна схема ППС має вигляд, наведений на рисунку 3.2.

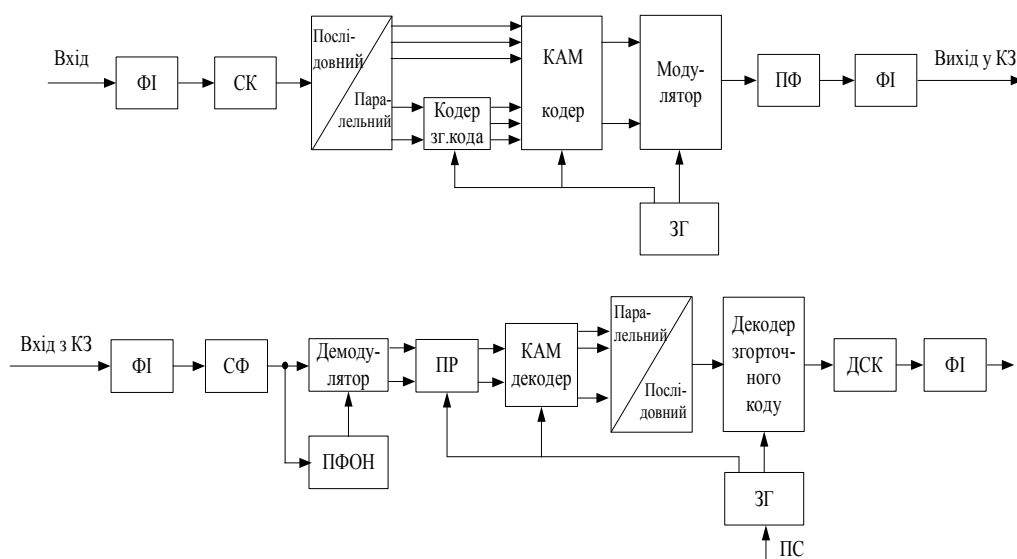


Рисунок 3.2

На вході й виході передавача й приймача включені вузли (ФІ), що реалізують функції фізичного інтерфейсу. Сигнал даних, що надходить на вхід передавача, може мати періодично повторювані комбінації, що містять велику кількість нулів. Наявність таких послідовностей ускладнює роботу пристрою синхронізації на приймальному кінці, тому до складу передавача включається скремблер (СК), що перетворить дані, що передаються, до вигляду, близькому до випадкового. На прийманні вмикають дескремблер (ДСК), що здійснює зворотне перетворення сигналу даних. З виходу скремблера сигнал надходить на вхід перетворювача послідовного коду в паралельний, котрий забезпечує розбиття вхідних символів на групи. Число елементів у групі визначається кратністю обраного виду модуляції. Для зворотного перетворення в приймачі служить перетворювач паралельного коду в послідовний. Далі перші символи кожної групи піддаються згортному кодуванню й разом з молодшими обробляються КАМ кодером, що здійснює відображення вхідних символів на сигнальну площину. На виході КАМ кодера маємо амплітуди синусної й косинусної складових, які на площині сигнального сузір'я відповідають абсцисі й ординаті декартової системи координат. Вихідний сигнал кодера в модуляторі перетворюється в модульований сигнал, придатний для передачі по виділеному каналу зв'язку.

У приймальній частині виконуються операції, зворотні тим, що виконувалися в передавальній частині, - фільтрація й демодуляція. Ці операції виконуються за допомогою смугового фільтра (СФ), передатна функція якого погоджена зі спектром прийнятого сигналу й демодулятора.

Опорні коливання - несуче й тактове, необхідні для роботи ППС, - виробляються на передавальному кінці задаючим генератором, на прийомній стороні для одержання когерентного коливання для демодуляції застосовується пристрій формування опорної напруги (ПФОН). А для вироблення тактових імпульсів, що забезпечують роботу пристрою реєстрації (ПР) і декодерів, використовується генератор, що синхронізується сигналами,

що надходять із пристрою синхронізації (ПС).

Розглянемо принципи побудови скремблера, модулятора й КАМ кодера.

Скремблювання полягає в посимвольному обчисленні результуючого коду на підставі додавання за модулем два символів вхідного коду й отриманих у попередніх тактах у попередніх тактах символів результуючого коду. Наприклад, якщо скремблер реалізує таке співвідношення:

$$b_n = a_n \oplus b_{n-6} \oplus b_{n-7},$$

де b_n - двійковий символ результуючого коду, отриманий на n -му такті роботи скремблера;

a_n - двійковий символ вхідного коду на n -му такті на вході скремблера;

b_{n-6} і b_{n-7} - двійкові символи результуючого коду, отримані на попередніх тактах роботи скремблера (відповідно на 6 і 7 тактах раніше поточного такту), а дескремблер - $a_n^* = b_n \oplus b_{n-6} \oplus b_{n-7}$,

то схема скремблера й дескремблера має вигляд, показаний на рисунку 3.3.

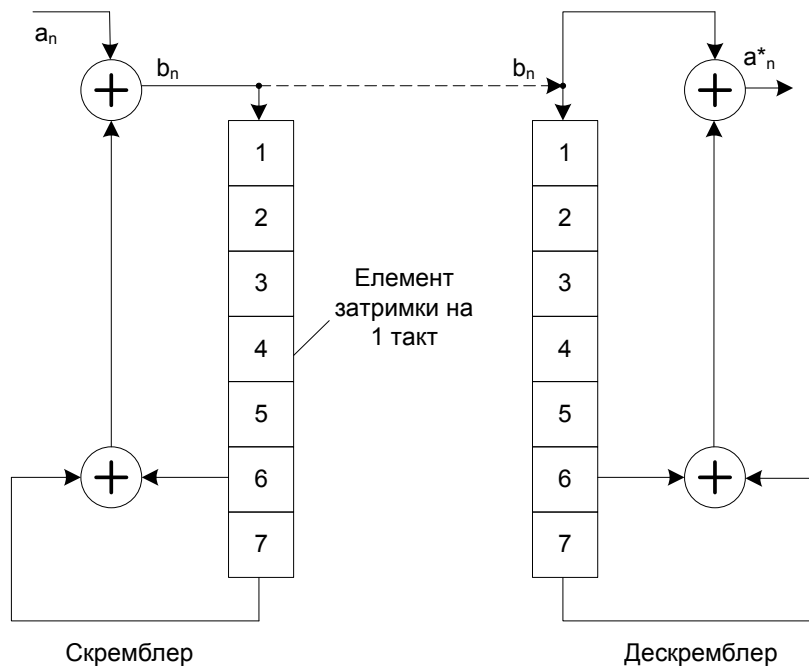


Рисунок 3.3

На рисунку 3.4 показана структурна схема модулятора й сигнальне сузір'я для випадку, коли сигнал $x(t)=a_i$ і $y(t)=b_i$ приймають значення $\pm 1, \pm 3$ (чотирирівнева КАМ). Величини $\pm 1, \pm 3$ визначають рівні модуляції.

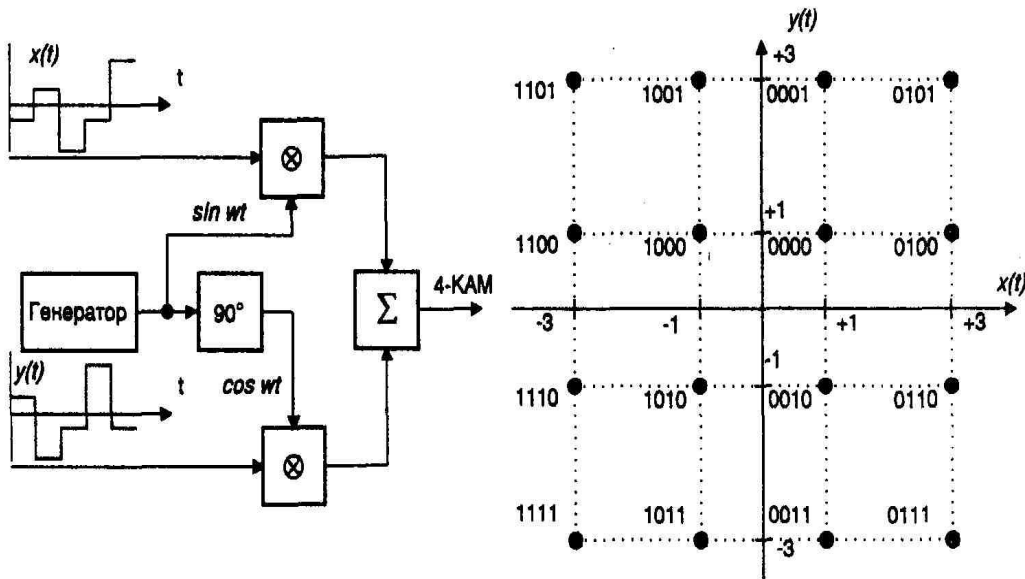


Рисунок 3.4

КАМ кодери будуються на основі цифроаналогових перетворювачів. Розглянемо принцип побудови на прикладі КАМ кодера для модулятора, зображеного на рисунку 3.4. Укрупнена функціональна схема його показана на рисунку 3.5.

У цьому випадку на вході модулятора повинні бути сформовані рівні напруги ± 1 В і ± 3 В. Знаки і значення амплітуд синусоїдальної (a_i) і косинусоїдальної (b_i) складових визначаються першими (a_0a_1) і другими (a_2a_3) двома символами квадрабіта. Для символів 00 і 01 амплітуди мають позитивні значення, для 10 і 11 - негативні значення. Значення амплітуд дорівнюють 1 Вольту для символів 00 і 10 і 3 В для символів 01 і 11.

Для одержання на виході цих значень амплітуд складових $x(t)$ і $y(t)$ пристрій керування (ПК) аналізує відповідні складові квадрабіта й підключає на вхід

операційного підсилювача резистор або R_1 , або R_2 . Для одержання позитивного значення резистори з'єднуються з негативним полюсом джерела опорної напруги, а для одержання негативного значення - з позитивним полюсом.

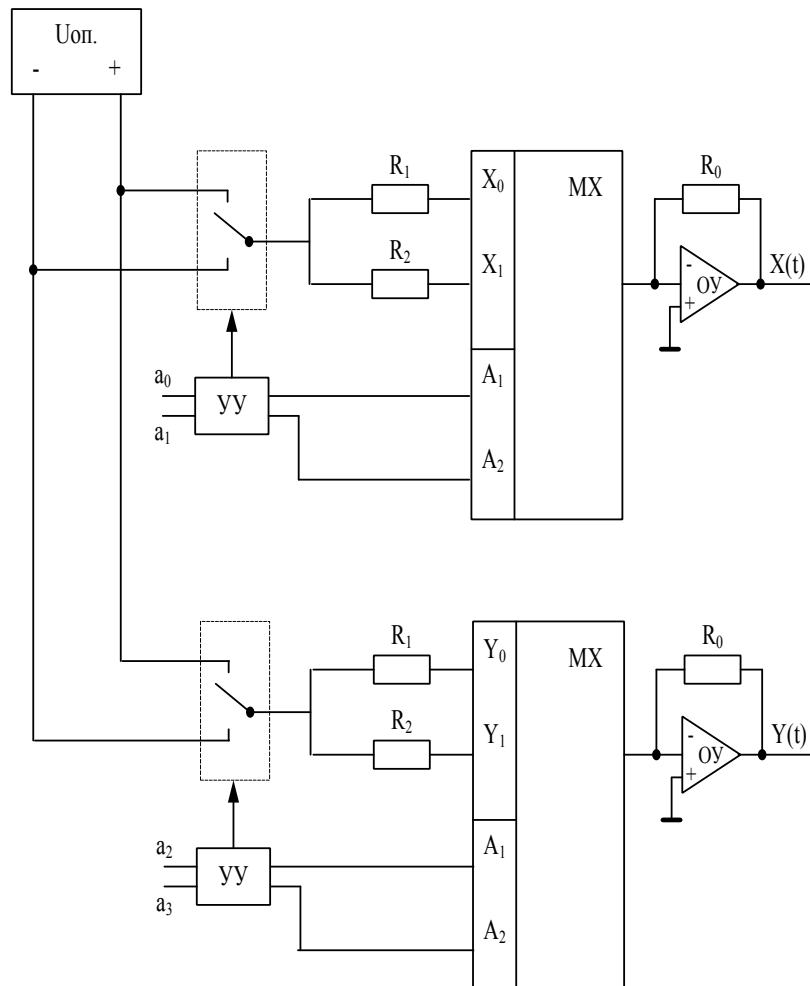


Рисунок 3.5

Вихідна напруга розраховується за формулою

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{оп}} R_0 / R_i,$$

де R_i – значення опорів резисторів, що підключені на вході мультимплексора.

Проектування ППС для аналогового каналу доцільно

проводити в такому порядку.

- 1 Розрахувати необхідну швидкість передачі інформації.
- 2 Розрахувати практично досяжну швидкість модуляції.
- 3 Визначити значення несучої частоти.
- 4 Визначити позиційність модуляції.
- 5 Визначити значення стрибків амплітуди й фази несучої.
- 6 Визначити ймовірність помилки на виході ППС.
- 7 Розробити схему ППС.

Розрахунок необхідної швидкості передачі інформації проводиться на підставі відомих: обсягу переданої інформації I_n , орієнтовної кількості службових символів I_{cc} і припустимого часу передачі T_n за формулою

$$R = (I_n + I_{cc}) / T_n.$$

Якщо число службових символів точно невідомо, то орієнтовно їхнє число вибирається в межах 5-10 % від обсягу переданої інформації.

Практично досяжна швидкість модуляції в каналі визначається на основі відомостей про канал зв'язку, по якому буде здійснюватися передача, й критерію Найквіста, тобто $B_{пр} = 0,7\Delta F$, де ΔF – смуга пропускання каналу.

Якщо система передачі дискретних повідомлень передбачає обмін з використанням каналу зворотного зв'язку, що організується шляхом частотного ущільнення, то всю смугу пропускання необхідно розділити на дві зони, пропорційно швидкостям модуляції в кожному з каналів.

Частоту несучої варто вибирати такою, що дорівнює середній частоті смуги пропускання каналу.

Позиційність модуляції m визначається виходячи зі співвідношення $R = B \log m$.

Визначивши позиційність модуляції, необхідно побудувати зіркову діаграму й визначити по ній значення амплітуд і фаз окремих елементів КАМ сигналу. При побудові зоряної діаграми значення a_i і b_i варто вибирати з

таких величин: 0; ±1; ±2; ±3; ±4; ±5; ±6; ±7; ±8; ±9 за умови забезпечення максимально можливого зсуву фаз між елементами сигналу. За зірковою діаграмою треба скласти таблицю значень фаз і амплітуд елементів КАМ сигналу, відповідному певному сполученню символів на вході модулятора.

Імовірність помилкового приймання одиничних елементів сигналу P_0 не повинна бути вище припустимої величини коефіцієнта помилок за елементами $K_{ном}^{доп}$. Припускаючи, що в каналі діють тільки флуктуаційні завади, що призводять до крайових спотворень на виході демодулятора, й що ці спотворення підлеглі нормальному закону розподілу $\varphi(\delta)$ з параметрами $a=\delta_{пр}$ і σ

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(\delta - a)^2 / 2\sigma^2\right],$$

імовірність помилкового приймання може бути визначена за формулою

$$P_0 = P(\delta > \delta_{доп}) = 1 - \int_{-\delta_{доп}}^{+\delta_{доп}} \varphi(\delta) d\delta. \quad (3.2)$$

З огляду на те, що параметром, що визначає допустиму величину спотворень, при яких здійснюється правильна реєстрація одиничних елементів, є виправляюча здатність пристрою реєстрації $\mu_{эфф}$, то у формулу (3.2) замість $\delta_{доп}$ необхідно підставляти значення $\mu_{эфф}$. Якщо ж умова $P_0 \leq K_{ном}^{доп}$ не виконується, то необхідно, розв'язавши рівняння (3.2) відносно $\delta_{доп}$, визначити необхідну величину виправляючої здатності.

Після проведених розрахунків на підставі типових функціональних вузлів ППС треба скласти детальну функціональну схему всього пристрою.

4 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ СИНХРОНІЗАЦІЇ

У системах передачі даних найчастіше застосовуються замкнуті пристрої синхронізації з дискретним керуванням без безпосереднього впливу на місцевий генератор. Функціональна схема такого пристрою синхронізації наведена на рисунку 4.1.

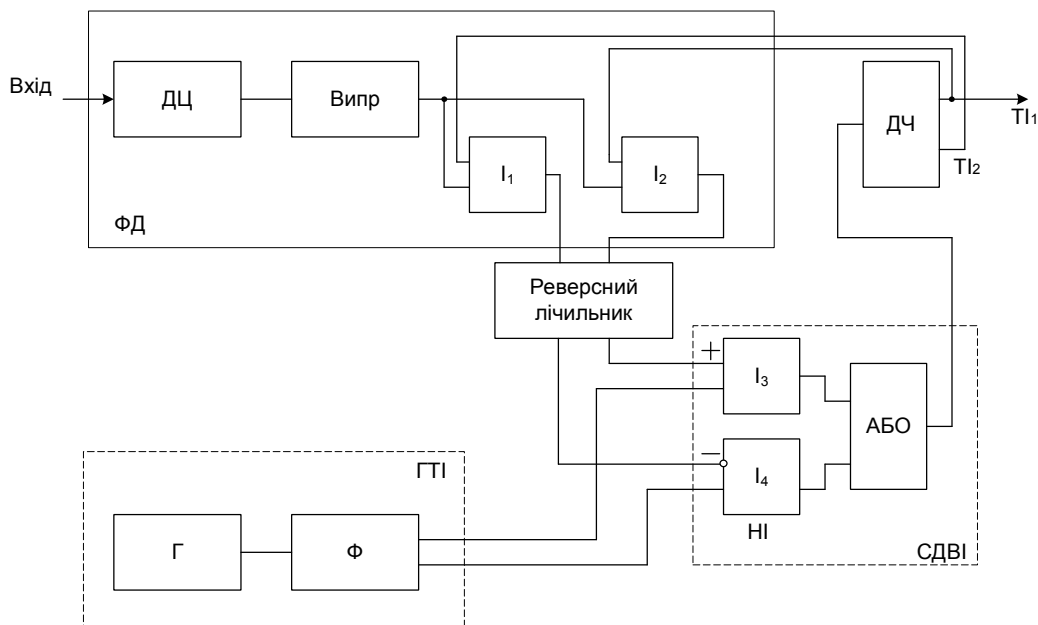


Рисунок 4.1

У фазовому дискримінаторі (ФД) відбувається порівняння фазового положення T_1 з положенням значущих моментів сигналів, що приймаються. За наявності неузгодженості фаз виробляється керуючий сигнал, що коригує фазу T_1 .

На виході ГТІ утворюються дві послідовності імпульсів із частотою $f = k_d \times f_t$, зсунутих одна відносно одної на півперіоду. Одна з послідовностей подається через схему заборони (НІ) в дільник частоти (ДЧ) з коефіцієнтом ділення k_d . З виходу подільника тактові послідовності T_{11} і T_{12}

подаються на фазовий дискримінатор (ФД). При наявності синфазності між прийнятими сигналами й місцевими T_{11} і T_{12} сигнал на виході фазового дискримінатора відсутній. При виникненні розфазування короткі імпульси з'являться на виході I_1 або I_2 залежно від знака розбіжності фази. (Призначення лічильника поки не розглядаємо). Якщо імпульс з'явиться на виході I_2 , то він відкриє схему I_3 , що пропустить один додатковий імпульс ГТІ на вхід дільника частоти. Цей імпульс буде розташований у середині між основними імпульсами, що проходять через схему заборони. Під дією цього імпульсу фаза тактової послідовності зсунеться у бік випередження на один крок Δt . Якщо ж імпульс з'явиться на виході I_1 , то він закриє схему заборони й у такий спосіб виключить один імпульс на вході дільника частоти. У результаті фаза тактової послідовності зсунеться на один крок Δt у бік відставання. Оскільки прийняті елементи сигналу зазнають крайових спотворень, то зсув значущих моментів за рахунок крайових спотворень буде призводити до помилкового коректування фази. Для виключення такого явища в схемі передбачається усереднюючий елемент. Сигнал з виходу усереднюючого елемента буде з'являтися лише в тому випадку, якщо число зсувів $3M$ в один бік перевищить число зсувів в інший бік. У розглянутій схемі таким пристроєм є реверсивний лічильник.

Основні параметри, що характеризують роботу пристрою синхронізації наведені нижче.

Крок корекції φ_k виражений у частках елементарної послілки зсув фази тактових імпульсів на виході подільника при додаванні або виключенні одного імпульсу:

$$\varphi_k = \frac{1}{K_d},$$

де K_d - коефіцієнт ділення подільника.

Мінімальний період коректування t_{\min} - найменший

час, протягом якого корекція фази не відбувається, тобто час між суміжними моментами спрацьовування пристрою синхронізації, с,

$$t_{\text{мін}} = \frac{\ell S}{B}, \quad (4.1)$$

де ℓ - число підряд переданих елементів одного знаку;
 S - ємність реверсивного лічильника;
 B - швидкість модуляції.

Час синхронізації $T_{\text{син}}$ - час, необхідний для усунення початкової розбіжності фаз, с,

$$T_{\text{син}} = \frac{K_d S \ell}{2B}, \quad (4.2)$$

Погрішність синхронізації ε - величина, що визначає найбільше відхилення фази тактових імпульсів від їхнього оптимального положення, яке може виникнути в процесі роботи пристрою синхронізації.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ст}} + \varepsilon_{\text{дин}}, \quad (4.3)$$

де $\varepsilon_{\text{ст}}$ - статична погрішність, що обчислюється за відсутності спотворень сигналу;
 $\varepsilon_{\text{дин}}$ - динамічна погрішність, що виникає внаслідок наявності спотворень у сигналі.

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \frac{1}{K_d} + 2k\ell S, \quad (4.4)$$

де k - коефіцієнт нестабільності частоти генератора.

$$\varepsilon_{\text{дин}} = 3 \sqrt{\frac{0,628\sigma}{K_d S}},$$

де σ - середньоквадратичне відхилення величини зсуву значущих моментів.

Час підтримки синфазності $T_{пс}$ – час, упродовж якого фаза тактових імпульсів не вийде за припустимі межі при припиненні роботи пристрою синхронізації, с,

$$T_{пс} = \frac{\mu_n - \varepsilon}{2Bk}, \quad (4.5)$$

де μ_n – номінальна виправляюча здатність приймача.

У загальному випадку задача розрахунку пристрою синхронізації формулюється в такому вигляді. Задано характеристики сигналу на вході й вимоги до пристрою синхронізації, які він повинен задовольняти:

- число підряд переданих елементів одного знака;
- швидкість модуляції;
- закон розподілу крайових спотворень із параметрами:
 - а - математичне очікування й σ – середньоквадратичне відхилення;
 - погрішність синхронізації, що повинна забезпечуватися з імовірністю p_ε ;
 - час синхронізації;
 - час збереження синфазності;
 - виправляюча здатність

Потрібно розрахувати такі параметри пристрою синхронізації:

- коефіцієнт ділення подільника;
- ємність реверсивного лічильника;
- необхідну нестабільність генератора при обмежуючих умовах:

$$\frac{1}{K_d} \geq 2k\varepsilon S,$$

$$T_{син} \leq T_{син доп},$$

$$T_{пс} \geq T_{пс доп},$$

$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{доп}}$ з імовірністю p_ε ;

- побудувати розгорнуту функціональну схему пристрою синхронізації, докладно розкривши схеми подільника й реверсивного лічильника.

Рішення можна шукати методом підбору. Вибираються значення визначувальних параметрів і перевіряється, чи задовольняють вони рівняння (4.1) - (4.5) і обмежуючі умови. Із трьох визначаємих параметрів можна вибрати два, наприклад, K_d і S . Стабільність генератора тоді знаходять із відповідної нерівності.

Найбільш важкою частиною є визначення динамічної погрішності. Будемо знаходити її при таких припущеннях:

1 Розбіжності частот генераторів передачі й приймання відсутні.

2 На вхід пристрою синхронізації надходить періодична послідовність із l підряд переданих елементів одного знаку.

3 Закон розподілу крайових спотворень підкоряється нормальному закону.

Розрахунок динамічної погрішності

У процесі помилкового коректування пристрій синхронізації можна розглядати як систему, що може перебувати в одному зі станів $-\varepsilon_i, \dots, -\varepsilon_2, -\varepsilon_1, \varepsilon_0, +\varepsilon_1, +\varepsilon_2, \dots, +\varepsilon_i$ (рисунок 4.2, б) і змінювати свій стан у дискретні моменти часу $t_0, t_1, \dots, t_k, \dots$, що відповідають моментам додавання або виключення імпульсів. При синфазному стані, коли погрішність синхронізації дорівнює нулю, система перебуває в стані $\varepsilon_0 = 0$. Неузгодженість фаз, наприклад на величину $+i\varphi_k$, відповідає стану системи $+\varepsilon_i = i\varphi_k$. Перехід системи в інший стан відбувається в кожний момент часу t_k у результаті порівняння фазового положення тактового імпульсу з положенням значення моменту, що зміщений у результаті крайових спотворень. У сталому режимі стан ε_0

означає, що тактові імпульси збігаються з найбільш імовірним положенням значущих моментів (рисунк 4.2, а).

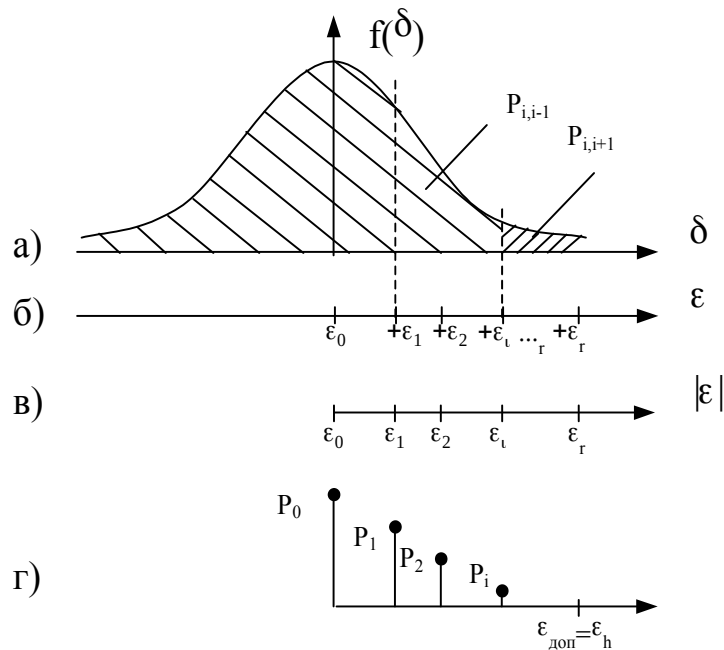


Рисунок 4.2

Розглянутий процес описується простим однорідним ланцюгом Маркова. Стан системи в момент часу t_k характеризуються умовними ймовірностями p_{ij} того, що система в наступний момент перейде в стан j за умови, що в момент t_k вона перебувала в стані i . Ці ймовірності називаються перехідними ймовірностями й записуються у вигляді матриці

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Привласнимо станам номери $1, 2, 3, \dots, N$. Число станів обмежено, тому що максимальний фазовий зсув менше $0,5$.

Матриця перехідних ймовірностей набуває вигляду

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

У матриці записані ймовірності переходів з кожного даного стану в усі можливі. Сума ймовірностей кожного рядка матриці дорівнює одиниці.

Для визначення динамічної погрішності необхідно знати безумовні ймовірності знаходження системи в кожному стані p_i . Якщо відомо $p_i(t_0)$ розподіл безумовних ймовірностей у момент часу t_0 , то розподіл безумовних ймовірностей стану системи в наступний момент часу t_1 визначається виразом

$$p_j(t_1) = p_i(t_0)p_{ij}. \quad (4.8)$$

Дійсно, у стан j система може перейти з будь-якого i -го початкового стану. Марковські ланцюги мають таку властивість, що в стаціонарному режимі, тобто після закінчення досить великого часу, ймовірність того, що процес буде перебувати в стані j , не залежить від того, з якого стану цей процес почав розвиватися, при цьому розподіл безумовних ймовірностей у моменти часу t_k і t_{k+1} при $k \rightarrow \infty$ збігаються й вираз (4.8) перетворюється в такий:

$$p_j = \sum_{i=1}^N p_i p_{ij}. \quad (4.9)$$

І оскільки система обов'язково перебуває в одному зі станів, то доповнимо цей вираз умовою

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1. \quad (4.10)$$

Система з $(N - 1)$ рівнянь (4.9) (без p_N) і рівняння (4.10) дозволяють знайти розподіл ймовірностей станів системи, якщо відомі перехідні ймовірності.

Однак необхідно враховувати, що за наявності реверсивного лічильника перехід з одного стану системи в інший буде відбуватися лише в тому випадку, коли число

зсувів фази значущих моментів щодо тактових імпульсів в один бік в середньому більше числа зсувів в іншу сторону. Якщо реверсивний лічильник ємністю S у момент t_0 перебуває в нульовому стані, то на виході з'явиться імпульс, якщо після приймання n спотворених значущих моментів рівно S раз зсув відбувався в одному напрямку.

Реверсивний лічильник ємністю S під діями вхідних сигналів може перебувати в одному з $(2S - 1)$ станів $-(S-1), -(S-2), \dots, -1, 0, 1, \dots, (S-2), (S-1)$ з імовірністю відповідно $p_{S-1}, p_{S-2}, \dots, p_{-1}, p_0, p_1, \dots, p_{S-2}, p_{S-1}$. Стан реверсивного лічильника можна подати як простий ланцюг Маркова. З кожного стану система переходить у сусідній (рисунок 4.3). Із крайніх станів система переходить у стани "0".

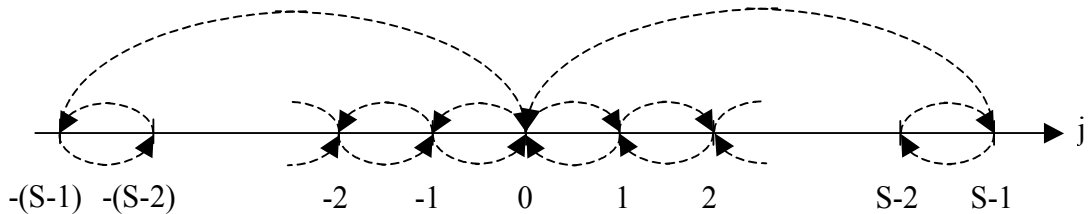


Рисунок 4.3

Ланцюг Маркова описується матрицею перехідних імовірностей:

$$P_S = \begin{matrix} & \begin{matrix} -(S-1) & -(S-2) & -(S-3) & -1 & \dots & 0 & 1 & 2 & \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} -(S-1) \\ -(S-2) \\ \vdots \\ -1 \\ 0 \\ +1 \\ \vdots \\ S-1 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 0 & P_{-(S-1),-(S-2)} & 0 & 0 & \dots & P_{-(S-1),0} & 0 & 0 & \dots \\ P_{-(S-2),-(S-1)} & 0 & P_{-(S-2),-(S-3)} & & \dots & & & & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & P & \dots & P_{0,-1} & & & \dots \\ 0 & 0 & 0 & P_{-1,0} & \dots & & P_{1,0} & & \dots \\ 0 & 0 & 0 & & \dots & P_{1,0} & 0 & P_{2,1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & & & & \dots & P_{(S-1),0} & & P_{(S-1),(S-1)} & \dots \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (4.11)$$

У матриці (4.11) перехідні ймовірності визначаються як

$$P_{i, i+1} = \int_{\varphi_k}^{\infty} f(\delta) d\delta = p_e = 1 - \Phi(x),$$

де $\Phi(x)$ – інтеграл ймовірності, який визначається згідно з даними додатка Б

$$P_{i, i-1} = 1 - P_{i, i+1} = q_e \quad (4.12)$$

і залежать від стану системи синхронізації, тобто від величини фазової неузгодженості. Зі зміною величини фазової неузгодженості змінюється матриця переходів (4.11).

За наявності реверсивного лічильника система синхронізації може або переходити в сусідній стан, або не змінювати свого стану, якщо на виході реверсивного лічильника не з'явиться сигнал "1".

Перехід у сусідні стани відбувається тоді, коли реверсивний лічильник переходить зі станів - (S-1) або (S-1) у стан "0". Тому система синхронізації описується матрицею типу (4.7), де

$$\begin{aligned} P_{l, l+1} &= P_{S-1} \cdot P_l, \\ P_{l, l-1} &= P_{-(S-1)} \cdot q_l, \\ P_{l, l} &= 1 - P_{S-1} \cdot P_l - P_{-(S-1)} \cdot q_l. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Таким чином, для розрахунку ємності реверсивного лічильника потрібно задатися коефіцієнтом S, обчислити для нього матриці (4.7) і (4.11) для всіх станів $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r$ і перевірити потім виконання нерівності

$$\sum_{k=0}^h p_k \geq p_\varepsilon, \quad (4.14)$$

де h - номер стану, при якому $\varepsilon_h = \varepsilon_{\text{доп}}$.

Розрахунок можна вважати закінченим, якщо при обраному S виконується нерівність (4.14).

Для оцінки нерівності (4.14) необхідно знати безумовні ймовірності знаходження системи в тім або іншому стані. Маючи в розпорядженні матриці умовних ймовірностей і використовуючи рівняння (4.9) і (4.10), можна визначити безумовні ймовірності в такий спосіб.

Нехай є деяка матриця умовних ймовірностей

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 & -r & -(r-1) & -(r-2) & -(r-3) & \dots & -2 & -1 & 0 & 1 & \dots & r-1 & r \\
 -r & \left| \begin{array}{cccccccccccc}
 0 & P_{-r,-(r-1)} & 0 & 0 & \dots & & & & & & & & \\
 P_{-(r-1),-r} & 0 & P_{-(r-1),-(r-2)} & 0 & \dots & & & & & & & & \\
 \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 -1 & & & & \dots & P_{-2,-1} & 0 & P_{0,-1} & & & & & \\
 0 & & & & \dots & & P_{0,-1} & 0 & P_{0,1} & & & & \\
 \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 & & & & & \dots & & & & & & \dots & P_{r,(r-1)} & 0
 \end{array} \right| \\
 & & & & & & & & & & & & & &
 \end{array}$$

Використовуючи рівняння (4.9) і (4.10), можна скласти систему рівнянь

$$\begin{aligned}
 P_{-r} &= P_{-(r-1)} \cdot P_{-(r-1),r}, \\
 P_0 &= P_{-1} \cdot P_{-1,0} + P_1 \cdot P_{1,0}, \\
 \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\
 P_i &= P_{i-1,i} + P_{i+1} \cdot P_{i+1,i}, \\
 \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\
 P_{r-1} &= P_{r-2} \cdot P_{(r-2),(r-1)} + P_r \cdot P_{r,(r-1)}, \\
 1 &= P_{-r} + P_{-(r-1)} + \dots + P_0 + \dots + P_i + \dots + P_r.
 \end{aligned}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, можна одержати

$$P_{i+1} = P_i \cdot \frac{P_{i,i+1}}{P_{i+1,i}} \tag{4.15}$$

Та

$$P_{-r} = \left[1 + \frac{P_{-r,-(r-1)}}{P_{-(r-1),-r}} + \frac{P_{-r,-(r-1)} \cdot P_{-(r-1),-(r-2)}}{P_{-(r-1),-r} \cdot P_{-(r-2),-(r-1)}} + \dots + \frac{P_{-r,-(r-1)} \cdot P_{-(r-1),-(r-2)} \cdot \dots \cdot P_{(r-1),r}}{P_{-(r-1),-r} \cdot P_{-(r-2),-(r-1)} \cdot \dots \cdot P_{r,(r-1)}} \right]^{-1} \quad (4.16)$$

Знаючи P_{-r} і перехідні ймовірності, можна знайти всі інші ймовірності за формулою (4.15).

Приклад. Нехай зсув границь прийнятих посилок у каналі відповідає нормальному закону розподілу з параметрами $a = 0$ і $\sigma = 3,2\%$. Найбільше число підряд прийнятих елементів одного знака $l = 5$. Припустима погрішність синхронізації $\varepsilon_{\text{доп}} = 3\%$. Припустима динамічна погрішність повинна забезпечуватися з імовірністю $p_\varepsilon = 0,98$. Потрібно визначити коефіцієнт ділення подільника, припустимий коефіцієнт нестабільності генератора і ємність реверсивного лічильника.

Вибираємо $K_d = 100$.

Мінімальна статична погрішність синхронізації

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \frac{1}{K_d} + 2\kappa l S.$$

Так як для стійкості коректування повинна виконуватися умова

$$\frac{1}{K_d} \geq 2\kappa l S, \quad \text{то приймаємо, що} \quad \frac{1}{K_d} = 2,2\kappa l S \quad \text{й} \quad S = 3.$$

Звідси

$$\kappa = 3 \times 10^{-4}, \quad \varepsilon_{\text{ст}} = \frac{1}{100} + 2 \times 3 \times 10^{-4} \times 5 \times 3 = 0,019 = 1,9\%.$$

За умовою

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ст}} + \varepsilon_{\text{дин}} = 3 \%,$$

отже,

$$\varepsilon_{\text{дин}} = 3 \% - 1,9 \% = 1,1 \%.$$

Отримана величина $\varepsilon_{\text{дин}} = 1,1 \% = \varepsilon_h$ за умовою не повинна перевищуватися з імовірністю 0,98.

Крок корекції $\varphi_k = \frac{1}{K_d} = \frac{1}{100} = 1 \%$. Це означає, що при переході системи зі стану ε_i у стан ε_{i-1} або ε_{i+1} різниця фаз розподільників передачі й приймання змінюється на 1,0% тривалості елементарної послідовності.

Оскільки $P_\varepsilon = 0,98$, то ймовірність перевищення величини $\varepsilon_h = 1,1 \%$ дорівнює $1 - P_\varepsilon = 0,02$.

Динамічну погрішність, що перевищує припустиму, можна припустити ε_r і вважати, що ймовірності появи більших величин динамічної погрішності (рисунок 4.2, а) дорівнюють нулю.

Величину r знайдемо з формули

$$r = \frac{\varepsilon_h}{\varphi_k} + 1 = \frac{1,1\%}{1,0\%} + 1 = 2,1 \approx 3.$$

Матриця перехідних імовірностей для реверсивного лічильника ємністю $S=3$ має вигляд

$$\begin{matrix} & -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ \begin{matrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 0 & P_e & q_e & 0 & 0 \\ q_e & 0 & P_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_e & 0 & P_e \\ 0 & 0 & q_e & 0 & P_e \\ 0 & 0 & P_e & q_e & 0 \end{matrix} \right\| \end{matrix}.$$

Складемо систему рівнянь для ймовірностей станів реверсивного лічильника:

$$\begin{aligned}
P_{-2} &= P_{-1}q_\ell; \\
P_{-1} &= P_{-2}p_\ell + P_0q_\ell; \\
P_0 &= P_{-1}p_\ell + P_{-2}q_\ell + P_1q_\ell + P_2p_\ell; \\
P_1 &= P_0p_\ell + P_2q_\ell; \\
P_2 &= P_1p_\ell; \\
\mathbf{1} &= P_{-2} + P_{-1} + P_0 + P_1 + P_2.
\end{aligned}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, і з огляду на те, що $q_\ell + p_\ell = 1$, знаходимо

$$P_2 = \frac{p_\ell^2}{3(1 - p_\ell q_\ell)}; \quad P_{-2} = \frac{q_\ell^2}{3(1 - p_\ell q_\ell)}. \quad (4.17)$$

Знайдемо перехідні ймовірності для реверсивного лічильника для різних величин неузгодженостей $\varepsilon_\ell = \ell\varphi_\pi$:

$$p_{\ell=0} = 1 - \hat{O}\left(\frac{\ell\varphi_k}{\sigma}\right) = 1 - \hat{O}(0) = 0,5;$$

$$p_{\ell=1} = 1 - \hat{O}\left(\frac{1 \times 1}{3,2}\right) = 0,378;$$

$$p_{\ell=2} = 1 - \hat{O}\left(\frac{2 \times 1}{3,2}\right) = 0,266;$$

$$p_{\ell=3} = 1 - \hat{O}\left(\frac{3 \times 1}{3,2}\right) = 0,174;$$

$$q_{\ell=0} = 0,5; \quad q_{\ell=1} = 1 - 0,378 = 0,622; \quad q_{\ell=2} = 1 - 0,266 = 0,734;$$

$$q_{\ell=3} = 1 - 0,174 = 0,826.$$

За формулами (4.13) і (4.17) знаходимо ймовірності переходів для системи синхронізації, які складають матрицю переходів, записану для абсолютних величин динамічної погрішності.

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{cccc}
& 0 & 1 & 2 & 3 \\
0 & \left\| \begin{array}{cccc}
0,889 & 0,111 & 0 & 0 \\
0,105 & 0,872 & 0,023 & 0 \\
0 & 0,164 & 0,829 & 0,008 \\
0 & 0 & 0,222 & 0,778
\end{array} \right\| \\
1 \\
2 \\
3
\end{array}
\end{array}$$

Виходячи із цієї матриці записуємо рівняння станів системи синхронізації

$$\begin{aligned}
& -(1-0,889)P_0 + 0,105 P_1 = 0; \\
& 0,111 P_0 - (1-0,872) P_1 + 0,164 P_2 = 0; \\
& 0,023 P_1 - (1-0,829) P_2 + 0,222 P_3 = 0; \\
& P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1.
\end{aligned}$$

Рішення системи рівнянь:

$$P_0 = 0,45233; P_1 = 0,47817; P_2 = 0,06706; P_3 = 0,00243.$$

Перевірка нерівності (4.14) показує, що коефіцієнт розподілу подільника і ємність реверсивного лічильника обрані правильно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Передача дискретных сообщений /Под ред. В.П. Шувалова - М.: Радио и связь, 1990. - 464 с.

2 Окунев Ю.Б., Плотников В.Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. - М.: Связь, 1976. - 184 с.

3 Шварцман В.О., Емельянов Г.А. Теория передачи дискретной информации. - М.: Связь, 1979. - 424 с.

4 Дженингс Ф. Практическая передача данных. - М.: Мир, 1989. - 272 с.

5 Мячев А.А. Интерфейсы средств вычислительной техники. Энциклопедический справочник. М.: Радио и связь, 1993. – 352 с.

6 Элементы теории передачи дискретной информации / Под ред. Л.П. Пуртова. - М.: Связь, 1972. - 232 с.

7 Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. - М.: Высшая школа, 1991.

ДОДАТОК А

Таблица циклических (n, k) кодов

j	N	k	d	f_j(x)
1	7	4	3	13
1	9	3	3	111
1	15	11	3	23
2	15	7	5	37
3	15	5	7	7

1	21	15	3	127
2	21	12	5	15
3	21	6	7	165
4	21	4	9	7
1	31	26	3	45
2	31	21	5	75
3	31	16	7	67
4	31	11	11	57
5	31	6	15	73
1	35	23	3	16475
2	35	11	5	13527
3	35	8	7	13
1	39	27	3	13617
2	39	15	7	17777
3	39	3	13	17075
1	51	43	3	763
2	51	35	5	727
3	51	27	9	433
4	51	19	11	471
1	63	57	3	103
2	63	51	5	127
3	63	45	7	147
4	63	39	9	111
5	63	36	11	15
6	63	30	13	155
7	63	24	15	133
1	73	64	3	1231
2	73	55	5	1027
3	73	46	9	1401
4	73	37	11	1145
5	73	28	15	1511
6	73	19	17	1113
j	N	k	d	f_j(x)
1	85	77	3	567
2	85	69	5	675
3	85	61	7	727
4	85	53	9	613
5	85	45	13	477
6	85	37	15	771
1	93	83	3	2065
2	93	78	5	45

3	93	68	7	3453
4	93	58	9	2413
5	93	53	11	75
6	93	43	15	3247
7	93	38	17	67
1	117	105	3	10377
2	117	93	5	13617
3	117	81	7	16757
4	117	69	9	17367
5	117	57	13	17777
6	117	51	17	103
7	117	39	21	13413
1	127	120	3	211
2	127	113	5	217
3	127	106	7	235
4	127	99	9	367
5	127	92	11	277
6	127	85	13	325
7	127	78	15	203
8	127	71	19	357
9	127	64	21	313
1	255	247	3	435
2	255	239	5	567
3	255	231	7	763
4	255	223	9	551
5	255	215	11	675
6	255	207	13	747
7	255	199	15	453
8	255	191	17	727
9	255	187	19	023
10	255	179	21	545
11	255	171	23	613
12	255	163	25	543
j	N	k	d	f_j(x)
1	511	502	3	1021
2	511	493	5	1131
3	511	484	7	1461
4	511	475	9	1231
5	511	466	11	1423
6	511	457	13	1055
7	511	448	15	1167

8	511	439	17	1541
9	511	430	19	1333
10	511	421	21	1605
11	511	412	23	1027
12	511	403	25	1751
13	511	394	27	1743
14	511	385	29	1617

У таблиці для кожного коду зазначені параметри n , k , d і співмножники $f_j(x)$ утворюючого багаточлена $G(x)$. Знаком j позначений номер коду з даним значенням n . Номер коду збільшується зі збільшенням кількості надлишкових символів у кодовій комбінації. Для реалізації пристрою, що кодує й декодує, необхідне знання утворюючого багаточлена.

Співмножники $f_j(x)$ багаточлена $G(x)$ для скорочення запису зазначені у восьмеричному поданні, при якому кожній цифрі співмножника $f_j(x)$ відповідає трирозрядне двійкове число. Наприклад, якщо в таблиці $f_j(x)$ задано у вигляді 431, то у двійковому запису цьому числу еквівалентне число 100 011 001, а відповідний багаточлен дорівнює $f_j(x) = x^8 + x^4 + x^3 + 1$. Утворюючий багаточлен $G_j(x)$, де j - порядковий номер n -елементного коду знаходиться за рекурентною формулою

$$G_j(x) = G_{j-1}(x) \times f_j(x),$$

причому

$$G_1(x) = f_1(x).$$

ДОДАТОК Б

Значення інтеграла ймовірностей $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$

X	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,5000	0,33	0,6293	0,66	0,7454	0,99	0,8389

0,01	0,5040	0,34	0,6331	0,67	0,7486	1,00	0,8413
0,02	0,5080	0,35	0,6368	0,68	0,7517	1,01	0,8437
0,03	0,5120	0,36	0,6406	0,69	0,7549	1,02	0,8461
0,04	0,5160	0,37	0,6443	0,70	0,7580	1,03	0,8485
0,05	0,5199	0,38	0,6480	0,71	0,7611	1,04	0,8508
0,06	0,5239	0,39	0,6517	0,72	0,7642	1,05	0,8531
0,07	0,5279	0,40	0,6554	0,73	0,7673	1,06	0,8554
0,08	0,5319	0,41	0,6591	0,74	0,7703	1,07	0,8577
0,09	0,5359	0,42	0,6628	0,75	0,7734	1,08	0,8599
0,10	0,5398	0,43	0,6664	0,76	0,7764	1,09	0,8621
0,11	0,5438	0,44	0,6700	0,77	0,7794	1,10	0,8643
0,12	0,5478	0,45	0,6736	0,78	0,7823	1,11	0,8665
0,13	0,5517	0,46	0,6772	0,79	0,7852	1,12	0,8686
0,14	0,5557	0,47	0,6808	0,80	0,7881	1,13	0,8708
0,15	0,5596	0,48	0,6844	0,81	0,7910	1,14	0,8729
0,16	0,5636	0,49	0,6879	0,82	0,7939	1,15	0,8749
0,17	0,5675	0,50	0,6915	0,83	0,7967	1,16	0,8770
0,18	0,5714	0,51	0,6950	0,84	0,7995	1,17	0,8790
0,19	0,5753	0,52	0,6985	0,85	0,8023	1,18	0,8810
0,20	0,5793	0,53	0,7019	0,86	0,8051	1,19	0,8830
0,21	0,5832	0,54	0,7054	0,87	0,8078	1,20	0,8849
0,22	0,5871	0,55	0,7088	0,88	0,8106	1,21	0,8869
0,23	0,5910	0,56	0,7123	0,89	0,8133	1,22	0,8888
0,25	0,5948	0,57	0,7157	0,90	0,8159	1,23	0,8907
0,25	0,5987	0,58	0,7190	0,91	0,8186	1,24	0,8925
0,26	0,6026	0,59	0,7224	0,92	0,8212	1,25	0,8944
0,27	0,6064	0,60	0,7257	0,93	0,8238	1,26	0,8962
0,28	0,6103	0,61	0,7291	0,94	0,8264	1,27	0,8980
0,29	0,6141	0,62	0,7324	0,95	0,8289	1,28	0,8997
0,30	0,6179	0,63	0,7357	0,96	0,8315	1,29	0,9015
0,31	0,6217	0,64	0,7389	0,97	0,8340	1,30	0,9032
0,32	0,6255	0,65	0,7422	0,98	0,8365	1,31	0,9049
X	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1,32	0,9066	1,54	0,9382	1,76	0,9608	1,98	0,9761
1,33	0,9082	1,55	0,9394	1,77	0,9616	1,99	0,9767
1,34	0,9099	1,56	0,9406	1,78	0,9625	2,00	0,9772
1,35	0,9115	1,57	0,9418	1,79	0,9633	2,10	0,9821
1,36	0,9131	1,58	0,9429	1,80	0,9641	2,20	0,9861
1,37	0,9147	1,59	0,9441	1,81	0,9649	2,30	0,9893
1,38	0,9162	1,60	0,9452	1,82	0,9656	2,40	0,9918
1,39	0,9177	1,61	0,9463	1,83	0,9664	2,50	0,9938

1,40	0,9192	1,62	0,9474	1,84	0,9671	2,60	0,9953
1,41	0,9207	1,63	0,9484	1,85	0,9678	2,70	0,9965
1,42	0,9222	1,64	0,9495	1,86	0,9686	2,80	0,9974
1,43	0,9236	1,65	0,9505	1,87	0,9693	2,90	0,9981
1,44	0,9251	1,66	0,9515	1,88	0,9699	3,00	0,9986
1,45	0,9265	1,67	0,9525	1,89	0,9706	3,10	0,9990
1,46	0,9279	1,68	0,9535	1,90	0,9713	3,20	0,9993
1,47	0,9292	1,69	0,9545	1,91	0,9719	3,30	0,9995
1,48	0,9306	1,70	0,9554	1,92	0,9726	3,40	0,9997
1,49	0,9319	1,71	0,9564	1,93	0,9732	3,50	0,9998
1,50	0,9332	1,72	0,9573	1,94	0,9738	3,70	0,9999
1,51	0,9345	1,73	0,9582	1,95	0,9744	3,80	0,9999
1,52	0,9357	1,74	0,9591	1,96	0,9750	3,90	1,0000
1,53	0,9370	1,75	0,9599	1,97	0,9756		

Визначення функції розподілу $F(x)$ випадкової величини X , розподіленої за нормальним законом з параметрами a й σ , здійснюється за формулою

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx .$$

Взаємозв'язок інтеграла ймовірностей з функцією

розподілу має такий вигляд:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - a}{\sigma}\right).$$

Визначення ймовірності влучення випадкової величини X на ділянку від α до β здійснюється відповідно до формули

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - a}{\sigma}\right),$$

$$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x).$$

Вихідні дані на проектування

Параметр	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Об'єм інформації, що передається за сеанс зв'язку, кбайт	276	1000	320	150	630	280	970	400	195	610
Час передачі, хв	4	10	5	2	6	3	9	4	3	6
Вид каналу зв'язку	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ	ТЧ
Імовірність появи помилки P_0	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Коефіцієнт групування помилок α	0,4	0,6	0,5	0,46	0,72	0,46	0,54	0,66	0,7	0,64
Відносна ефективна швидкість передачі R	0,94	0,96	0,95	0,97	0,94	0,96	0,97	0,98	0,95	0,97
Довжина лінії зв'язку L, км	80	90	60	100	80	40	60	50	70	80
Час синхронізації Tсин, с	8	6	10	5	8	7	10	9	8	7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Час підтримки синхронізму, Тпс с	2	2	4	1	2	3	4	2	2	3
Виправна здатність приймача μ	0,42	0,46	0,4	0,38	0,44	0,46	0,48	0,42	0,46	0,48
Математичне очікування величини крайових спотворень α	0	0,15	0,2	0,1	0	0,21	0,14	0,22	0,16	0,24
Середньоквадратичне відхилення величини крайових спотворень σ	0,4	0,35	0,45	0,26	0,34	0,26	0,41	0,4	0,38	0,29
Погрішність синхронізації $\epsilon_{\text{доп}}$	0,06	0,1	0,12	0,1	0,09	0,05	0,10	0,06	0,08	0,1
Імовірність неперевіщення погрішністю синхронізації допустимої величини $P\epsilon$	0,98	0,95	0,94	0,96	0,97	0,98	0,97	0,94	0,95	0,98
Допустима ймовірність помилкового приймання $P_{\text{пом д}}$	10^{-6}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Алгоритм скремблювання $b_n =$	$a_n + b_{n-3} + b_{n-5}$	$a_n + b_{n-2} + b_{n-4}$	$a_n + b_{n-5} + b_{n-7}$	$a_n + b_{n-3} + b_{n-5} + b_{n-7}$	$a_n + b_{n-6}$	$a_n + b_{n-4} + b_{n-5}$	$a_n + b_{n-3} + b_{n-6}$	$a_n + b_{n-4} + b_{n-7}$	$a_n + b_{n-2} + b_{n-5}$	$a_n + b_{n-3} + b_{n-6}$

Таблиця 1.11

Параметри й показники системи зв'язку					
Зовнішні параметри			Внутрішні параметри		
інформаційні	техніко-економічні	техніко-експлуатаційні	апаратурно-реалізаційні	технічних рішень	конструктивно-економічні
питома пропускна здатність: пропускна здатність, смуга частот	компактність: габарити, маса	вартість експлуатації	динамічний діапазон	вид модуляції	показник перспективності
		середній час безвідмовної роботи	програмна реалізація	вид спектра сигналу	показник уніфікації
питома завадостійкість: ймовірність помилки, відношення сигнал/завада	вартість	універсальність: число градацій швидкості передачі, кількість джерел сигналів	апаратна реалізація	спосіб синхронізації	інженерно-психологічні показники
				метод приймання	

