

СИСТЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.391:62-503.56

Валентин Борщ¹, Валерій Коваль²,
Євген Коршун³, Михайло Михайлов⁴

¹Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, кафедра АЕЗ,
²Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, НДС НАЦ "Телеком",

³Український науково-дослідний інститут радіо і телебачення, дирекція,

⁴ВАТ "Укртелеком", дирекція первинних мереж

ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ВИДІЛЕННЯ ТАКТОВИХ СИНХРОСИГНАЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

© Борщ Валентин, Коваль Валерій, Коршун Євген, Михайлов Михайло, 2004

Розглянуто теоретичні методи виділення тактових синхросигналів (ТСС) телекомунікаційних мереж та розроблено статистичний метод виділення ТСС із інформаційного сигналу на базі прийняття оптимальних рішень.

Запропоновано перспективну технологію обробки цифрового сигналу електро-зв'язку з метою завадостійкого виділення ТСС в цифрових системах і мережах телекомунікацій.

In this article the theoretical methods of telecommunication networks sync signals selection (TSS) are considered and the statistical method of selection TSS from an information signal on the basis of accepted optimal solutions is developed.

The perspective technology of electric communication digital signal processing is offered with the purpose of noise-resistant selection TSS in digital systems and networks of telecommunications.

Вступ

Синфазне і синхронне функціонування між передавачем і регенератором (приймачем) цифрових систем передачі і мереж телекомунікацій практично неможливе без процесу синхронізації. Узгодження вказаного функціонування виконують за допомогою систем тактової синхронізації, в яких основними сигналами є тактові синхросигнали (ТСС).

Отримання ТСС в цифрових системах переміщення інформації (ЦСП) здебільшого здійснюють за допомогою видільників тактових синхросигналів (ВТС), які виділяють ТСС із цифрового сигналу електрозв'язку (ЦСЕ), що прийшов із лінії зв'язку. Технологія обробки випадкового лінійного ЦСЕ зводиться до виділення регулярної складової, що в ньому скрита, та формування ТСС з заданими якісними показниками.

Традиційні способи виділення ТСС із ЦСЕ переважно ґрунтувались на теорії фільтрації. Технічною реалізацією ВТС були резонансні контури, контури вибухових збуджень, вузько-смужових фільтрів (ВCF) тощо. Таким ВТС притаманні недоліки принципового характеру. Вони забезпечували роботу ЦСП за просторового і частотного переміщення інформації на низьких швидкостях. Збільшення швидкості переміщення інформації до декількох десятків Мбіт/с порушувало якість отриманої інформації або зовсім зривало організацію зв'язку. Крім того, ситуація ще більше ускладнилась з втіленням сучасних високошвидкісних ЦСП, які використовують недвійкові коди і відповідні їм багаторівневі сигнали. Вищенаведена обставина потребувала завадостійкіших та більш швидкодіючих ВТС.

У цій роботі розглядаються сучасні ВТС ЦСПІ з позицій теорії прийняття оптимальних рішень та побудови на базі оптимальної за швидкодією системи фазового автопідстроювання частоти (СФАПЧ).

1. Принципи побудови видільників ТСС

Уявімо собі таку задачу. Маємо N об'єктів або підсистем, які територіально (скажемо, в межах країни) віддалені один від одного, тобто велику систему. Такими об'єктами або підсистемами можуть бути інформаційні мережі та інформатизаційні інфраструктури, енергосистеми, залізничний транспорт, нафтогазопроводи, радіоелектронні комплекси, автоматизовані системи управління обороною тощо, які організаційно об'єднані самі по собі та мають взаємозв'язок і взаємодію між собою та з іншими великими системами за межами вказаної території. Елементи і підсистеми великої системи можуть мати різні шкали часу як за внутрішньої взаємодії, так і за взаємодії з іншими великими системами через те, що процеси в них протікають з різною швидкістю. У цій ситуації виникає потреба в координації їх діяльності, що означає по суті синхронну та синфазну їх роботу, тобто виникає необхідність синхронізації. В словнику Вебстера [1], синхронізація – це дії по організації синхронної роботи пристроїв або узгодження процесів в часі вирівнюванням їх часових шкал.

В подальшому науково-технічне дослідження синхронізації функціонування великих систем вестимемо на прикладі синхронізації національних інформаційних мереж та інформатизаційних інфраструктур (НІМІІ) в цілому і України зокрема.

І так, нехай НІМІІ як велика система має N підсистем як об'єктів синхронізації (ОС). Потрібно знайти обґрунтоване рішення синхронізації ОС НІМІІ.

Отже, об'єкт дослідження – НІМІІ; предмет дослідження – синхронізація ОС НІМІІ.

Першим очевидним розв'язком поставленої задачі є пропозиція забезпечити кожний ОС окремим незалежним пристроєм синхронізації. Таке рішення відоме під назвою автономна, демократична, плезіохронна синхронізація [1, 2]. Але реалізація вказаної синхронізації має свої переваги та недоліки.

За автономної синхронізації ОС фактично не об'єднані в мережу синхронізації (МС). Таку синхронізацію в деяких літературних джерелах називають системами абсолютного синхронізму [2]. Робота систем синхронізації ґрунтується на використанні синхронізуючої міри частоти, яка генерується високостабільними опорними генераторами. З одного боку, такий прийом ідеальний: отримання тактового синхросигналу від автономних високостабільних генераторів забезпечує формування стабільного тактового синхросигналу (ТСС), який не залежить від лінійних пошкоджень та завад на інформаційній мережі. Це головна перевага такої синхронізації – велика „живучість” мереж електрозв'язку. З іншого, – ОС НІМІІ повинні отримувати ТСС з номінальним значенням тактової частоти на весь період експлуатації НІМІІ або ж на тривалий час. Виконання цієї вимоги потребує буквально прецизійної, з точки зору нестабільності, частоти, яка формується ТГ. Отримати такий синхросигнал складно та в деяких випадках і немає у цьому такої необхідності.

На практиці орієнтація була взята на використання як автономних ТГ атомні стандарти частоти (АСЧ), що уможливило б за допомогою еластичної пам'яті ємністю, яка дорівнює, наприклад, обсягу інформації одного циклу, забезпечити плезіохронний режим роботи інформаційних мереж.

Як АСЧ використовуються квантові стандарти частоти – рубідієві, цезієві, водневі мазери.

Друга ідея пошуку рішення поставленої задачі впливає ось із чого: розбити усі ТГ об'єктів синхронізації на дві групи: 1) первинні, ведучі (ВТГ); 2) вторинні, ведені (ВдТГ). ВТГ ще називають первинним еталонним генератором (ПЕГ) (PRC – Primary Reference Clock), або первинним опорним джерелом (PRS – Primary Reference Source), або первинним джерелом синхронізації (ПДС). ПЕГ генерує сигнал еталонної тактової частоти для синхронізації всіх ОС країни або ОС великого регіону з якістю, яка відповідає вимогам міжнародних стандартів. ВдТГ (SC – Slave Clock) управляється сигналом еталонної тактової частоти, який формується ПЕГ. Якщо

з'єднати лініями зв'язку лінії ВТГ з ВдТГ з метою переміщення сигналів еталонної тактової частоти від перших до других, то отримуємо мережу синхронізації, яка, як правило, має ієрархічну архітектуру. В цьому разі виникає завдання вибору методу переміщення ТСС. Сьогодні для розв'язання цього завдання використовуються два методи переміщення синхроінформації: 1) по окремих виділених лініях зв'язку разом з корисною інформацією або роздільно; 2) виділенням синхросигналів із вхідного інформаційного сигналу. Головна перевага першого методу полягає в простоті реалізації вхідних ланцюгів обладнання ВдТГ і управління. Разом з тим, цей метод має істотні недоліки: переміщення ТСС займає якусь частину смуги корисних сигналів, що передаються, що знижує ефективність систем передачі, а використання окремих каналів зв'язку робить передачу дорожчою; процес синхронізації має свою тривалість і на нього витрачається потужність; переміщення синхросигналів займає відокремлені від інформаційних сигналів тракти передачі, що призводить за наявності завад, завмирань тощо до різних спотворень цих сигналів, що може помітно погіршити як саму якість синхронізації, так і роботу всієї системи передачі. Область використання методу з окремими синхроканалами – це системи та інформаційні мережі, які мають стабільні характеристики і незначні величини шумів. Але варто враховувати факт наявності великої кількості каналів зв'язку з вводом оптико-волоконних ліній зв'язку і їх здешевлення, що робить техніко-економічно обґрунтованим використання цього методу на напрямках з великою кількістю (десятки) інформаційних каналів, які синхронізуються від одного задаючого генератора.

Другий метод переміщення синхроінформації між ВТГ і ВдТГ є виділення ТСС із інформаційного [2, ..., 4].

Виділення тактового синхросигналу – це отримання тактового сигналу із сигналу, який приймається. Видільник ТСС – пристрій, що виділяє синхросигнал із сигналу, який приймається. Цей метод реалізується двома способами: 1) виділення із інформаційного сигналу спеціально замішаних в ньому синхросигналів (пілот-сигналів); 2) виявленням синхроінформації, яка скрита в інформаційному сигналі. Таким чином, один із головних недоліків цих двох способів виділення ТСС закладено в самій реалізації – в спектрі лінійного інформаційного сигналу повинні бути сигнали тактової частоти. Але ця вимога не завжди виконується: енергетичні спектри лінійних цифрових сигналів (бінарних, різні види трійкових, квазітрійкових тощо багаторівневих сигналів, сигналів з парціальним відкликом) не мають складової тактової частоти. У цьому разі потрібні інші методи виділення ТСС із інформаційного.

Теоретичною основою резонансного методу є подання енергетичного спектра випадкового імпульсу некорельованого сигналу $F(\omega)$ (рис. 1) на частоті слідування f_T [2, ..., 4] у вигляді безперервної $F_H(\omega)$ і дискретної $F_D(\omega)$ складових:

$$F(\omega) = \sigma^2 F_H(\omega) + a^2 F_D(\omega), \quad (1)$$

де σ^2 – дисперсія випадкових амплітуд імпульсів; a – середнє значення імпульсної послідовності.

Тактові імпульси (синхросигнал) виділяються безпосередньо із послідовності інформаційних сигналів (символів) високовибірковими вузькосмуговими фільтрами (ВСФ), які здебільшого являють собою резонансні контури, що настроєні на тактову частоту f_T .

Відповідно до виразу (1) амплітуда гармонік дискретної складової $F_D(\omega)$ прямопропорційна квадрату середнього значення імпульсного сигналу a^2 . У спектрі групового ЦСЕ з ІКМ, який являє собою послідовність двополярних інформаційних сигналів із середнім значенням $a = 0$, відсутня дискретна складова з частотою f_T . Як наслідок, із цієї обставини виникає необхідність з метою селекції синхроімпульсів домогтись, щоб середнє значення послідовності інформаційних сигналів було відмінним від 0 ($a \neq 0$). У цьому разі виникає дискретна складова спектра $F_D(\omega)$, яка являє собою набір гармонік, кратних основній частоті слідування імпульсів $\omega_T = 2\pi f_T$, включно і f_T . Ця мета досягається нелінійним перетворенням двополярних сигналів в однополярні з $a \neq 0$.

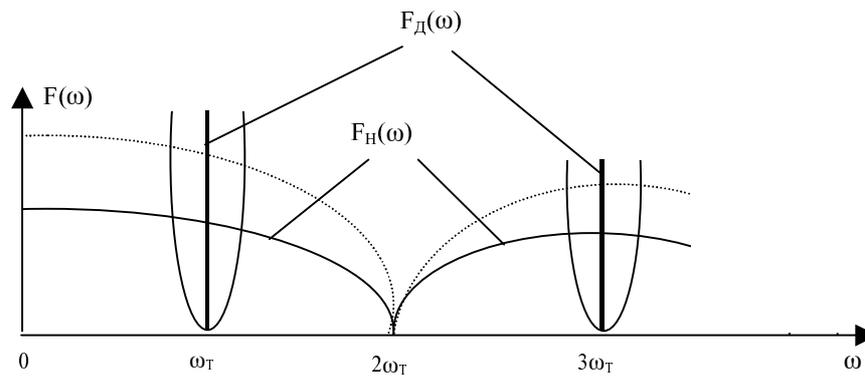


Рис. 1. Енергетичний спектр випадкового імпульсу сигналу $F(\omega)$

Типова апаратна реалізація резонансних пристроїв тактової синхронізації відповідно до викладеної вище ідеї виділення синхроімпульсів можлива структурною схемою, яка зображена на рис. 2. Дві послідовності тактових імпульсів TI_1 і TI_2 , які необхідні для пристроїв реєстрації і регенерації окремих символів ЦСЕ, формуються шляхом проходження послідовності інформаційних сигналів через каскадно з'єднані диференціюючий елемент $ДЕ_1$, двопівперіодний випрямляч, підсилювач потужності, резонансний контур, обмежувач, диференціюючий елемент $ДЕ_2$ та формуючий пристрій.

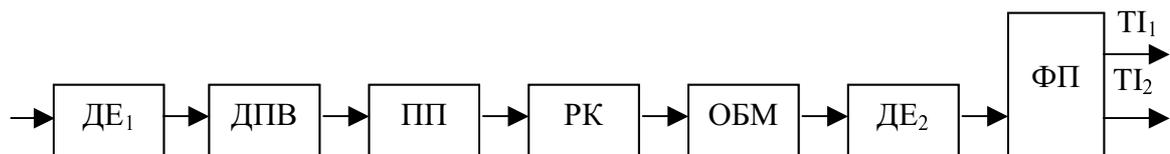


Рис. 2. Структурна схема резонансного пристрою виділення тактового синхросигналу:
 $ДЕ_1$ і $ДЕ_2$ – відповідно 1 і 2 диференційні елементи; ДПВ – двопівперіодний випрямляч; ПП – підсилювач потужності; РК – резонансний контур; ОБМ – обмежувач; ФП – формуючий пристрій; TI_1 і TI_2 – відповідно перша та друга послідовності імпульсів

Суттєвість способу формування тактової частоти [5] полягає у виділенні регулярної складової із інформаційного ІКМ-сигналу, енергетичний спектр якого можна розкласти на неперервну і дискретну частини. Неперервній частині спектра відповідає випадкова складова, а дискретній – регулярна. Пристрій формування тактового синхросигналу [5] включає в себе послідовно з'єднані двопівперіодний випрямляч, підсилювач, вузькосмуговий фільтр, пристрій формування коротких імпульсів з частотою слідування f_T . В цьому пристрої нелінійний перетворювач, який об'єднує випрямляч та підсилювач, виділяють дискретну складову спектра випадкової вхідної послідовності інформаційних імпульсів, а вузькосмуговий фільтр формує коливання основної частоти слідування імпульсів.

2. Первинна обробка ЦСЕ з метою виділення скритих періодичностей на базі теорії прийняття оптимальних рішень

Завданням видільника тактового синхросигналу (ВТС) є обробка цифрового сигналу електрозв'язку (ЦСЕ), який приходить з лінії, з метою виділення тактового синхросигналу (ТСС).

Традиційні способи виділення ТСС із ЦСЕ переважно ґрунтувалися на теорії фільтрації та зводилися до підбору коефіцієнтів передачі фільтра, за допомогою якого на його виході формувалася функція часу, яка з найменшою похибкою відтворювала вхідну функцію часу. Технічна реалізація

таких ВТС здійснювалася з використанням резонансних контурів, контурів ударного збудження, вузькосмугових фільтрів (ВСФ) тощо, до складових елементів яких пред'являлися дуже часто претензійні вимоги. Разом з цим таким ВТС притаманні недоліки і принципового характеру, які закладені в самому способі виділення ТСС. Насамперед до них відносяться можливість втрати синхронізації за рахунок “зриву” коливальних на виході резонансного контуру, зокрема при коротких перервах зв'язку (“завмираннях”) в каналах зв'язку, за наявності довгих послідовностей символів без зміни їх фронтів в структурі ЦСЕ, що може призвести до зупинки роботи апаратури в цілому. Із-за цього явища в цифрових системах передачі інформації (ЦСП) забороняється використання кодових груп з тривалою відсутністю змін фронтів імпульсів або ж виникає потреба у використанні операції скремблювання-дескремблювання. Крім того, такі ВТС мають низьку заводостійкість за рахунок одержання на виході ВСФ “квазігармонічних”, а не гармонічних коливальних, оскільки на його вхід поступає випадкова послідовність збуджуючих імпульсів; малу точність фазування за рахунок паразитичних фазових тремтінь, оскільки неперервна частина спектра вхідного ЦСЕ попадає в смугу пропускання фільтра і відіграє роль завади (рис. 2). Між тим резонансний метод виділення ТСС знаходить широке розповсюдження і задовольняє роботі ЦСП за просторового і часового переміщення інформації на низьких швидкостях. Збільшення швидкості передачі інформації до декількох десятків Мбіт/с при цьому способі виділення ТСС порушувало якість переміщення інформації, а подекуди і зовсім робило її неможливою. Ця обставина пояснюється тим, що у вітчизняних і зарубіжних високошвидкісних ЦСП використовуються двійкові коди і відповідні їм багаторівневі сигнали, які дають змогу повніше використовувати медіа-середовище розповсюдження, збільшувати довжину регенераційної ділянки тощо. Своєю чергою, ця ситуація підвищила вимоги до часового положення моментів рішення, що задаються ВТС регенератора відносно значущих моментів ЦСЕ, а з іншого боку призводить до збільшення фазових тремтінь цифрового сигналу на виході ВТС. Величина фазових тремтінь залежить насамперед від статистик ЦСЕ, що приймається, його коду, кількості рівнів, щільності заповнення інформаційним імпульсом тактового інтервалу та інших чинників. Збільшення питомих швидкостей передачі до десятків біт/с·Гц викликає корінні зміни роботи ВТС порівняно з роботою низькошвидкісних ВТС ЦСП. Ця обставина пояснюється високим коефіцієнтом використання смуги частот каналу зв'язку, необхідністю врахування впливу реальних умов переміщення інформації, які характеризуються наявністю істотних нелінійностей фазо- і амплітудно-частотних характеристик каналу зв'язку; статистик його часових характеристик, використанням недвійкових кодів і відповідних їм багаторівневих сигналів.

Отже, забезпечення високих питомих швидкостей передачі інформації поставило жорсткіші вимоги до ВТС та їх реалізації в сучасних системах і мережах телекомунікацій. Розвиток теорії розрахунку ВТС та останні досягнення в галузі схемотехніки дають можливість створення сучасних ВТС з високими якісними показниками (малою тривалістю входження в синхронізм, високою точністю роботи, збільшенням заводостійкості, розширенням функціональних можливостей, оптимізацією режимів роботи тощо).

3. Математична формалізація постановки задачі оптимального виділення скритих періодичностей ЦСЕ

Аналітично випадкову однополярну послідовність імпульсів на вході ВТС подамо у вигляді

$$I(t) = \sum_{i=0}^N \alpha_i a_i(t_i + \tau_i), \quad (2)$$

де $t_i = t_i' \pm \Delta t_i$ – час приходу i -го імпульсу; $t_i' = iT, i = \overline{1, N}$; T_i – період i -го тактового інтервалу [2]; для синхронних систем зв'язку $T_i = T = \text{const}$; Δt_i – часовий зсув i -го імпульсу відносно i -го значущого моменту t_i' , $0 \leq \Delta t_i \leq \frac{T}{2}$; a_i – випадкова величина, яка приймає з вірогідністю

p_{ai} значення, що дорівнює 1, якщо є i -ий імпульс, і 0 – з вірогідністю $(1 - p_{ai})$ у разі пропуску імпульса, вона відображає структуру кодового рисунка; $a_i = a_n \pm \Delta_{ai}$ – амплітуда i -го імпульсу; a_n – середнє значення амплітуди; Δ_{ai} – випадкова величина флуктуацій амплітуди; $\tau_i = \tau_n \pm \Delta\tau_i$ – тривалість i -го імпульсу; τ_n – середня тривалість i -го імпульсу $0 \leq \tau_{ii} \leq T$; $\Delta\tau_i$ – випадкове продовження чи скорочення i -го імпульсу; $0 \leq \Delta\tau_i \leq T$; N – випадкова кількість імпульсів.

В подальшому без спеціальних застережень вважатимемо, що початок відліку (поява першого імпульсу) збігається з початком тактового інтервалу T .

Параметри послідовності імпульсів (1) $\Delta t_i, \alpha_i, \Delta a_i, \Delta \tau_i, N$ є випадковими величинами, що дає право називати її випадковим процесом, який являє собою сукупність (ансамбль) випадкових функцій часу. Таким чином, як математичну модель сигналу на вході ВТС сприйматимемо імпульсний процес з детермінованим тактовим інтервалом, який у загальному випадку не є стаціонарним.

Для випадків, коли енергетичні спектри лінійних цифрових сигналів не містять складової тактової частоти (а таке буває дуже часто, як відмічалось раніше, коли при переміщенні цифрових потоків за допомогою ЦСП залежно від співвідношення швидкості передачі і смуги пропускання каналів зв'язку використовують бінарні, різні види трійкових, квазітрійкових та інших багаторівневих сигналів, а також сигнали з парціальним відкликом), виділення ТСС із лінійного ЦСЕ здійснюється нелінійною обробкою випадкової вхідної послідовності інформаційних імпульсів (диференціювання, множенням на 2 тощо), в результаті якої вдається розкласти її на випадкову і регулярну складові, а потім з останньої виділити основну гармоніку частоти проходження імпульсів [2, 5].

Нехай задано випадковий процес $\{I(t)\}$ відповідно до виразу (2), який являє собою невідому суміш інформаційного ЦСЕ і шуму; а його реалізації I повністю визначені на просторі $\Gamma \in I$. Нехай також α_i – випадкова величина i -го імпульсу, яка приймає з ймовірністю p_a значення, що дорівнює $d=1$, якщо є i -ий імпульс, і $d=0$, з ймовірністю $(1 - p_{ai})$, якщо він відсутній, та така, що виступає як параметр, який належить відомій області Ω_n . Допустимо, що спостерігається скінченна сукупність випадкових величин $\{u(t_i)\}$, $i=1, N$, яка повністю описується N -мірною функцією розподілу ймовірностей $F(u/\alpha_i)$ залежно від α_i .

Вимагається за тривалість тактового інтервалу T_n по результатах спостереження реалізації $u(t)$ згідно з вирішальним правилом $\Pi \in \Pi_d$ із класу допустимих і яке відображає множину Γ в множину D рішень $\Pi : \Gamma \Rightarrow D$, прийняти оптимальне рішення $d=\Pi(u)$, $d \in D$ для кожної можливої реалізації $U \in \Gamma$, щоб забезпечувалась мінімум функції ризику $r(\alpha_i, \Pi) = M[\Pi(\alpha_i, \Pi(U/\alpha_i))]$, де $M[\Pi(\alpha_i, \Pi(u/\alpha_i))]$ – математичне очікування випадкової функції втрат $\Pi(\alpha_i, d) = \Pi(\alpha_i, \Pi(u))$, яка показана у вигляді матриці втрат:

$$\Pi(\alpha_i, d) = \begin{bmatrix} \Pi(0, d_0) & \Pi(0, d_1) \\ \Pi(1, d_0) & \Pi(1, d_1) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Нехай задано імпульсний випадковий процес $\{I(t)\}$ з детермінованим тактовим інтервалом відповідно до виразу (2), k -а реалізація $u_k(t)=u(t)$ якого впливає на тактовому інтервалі $T_H=T$ на вхід ВТС з врахуванням шуму $n(t)$ і завади $\eta(t)$:

$$u(t) = F[c(t, \lambda); n(t); \eta(t)], \quad 0 \leq t \leq T. \quad (4)$$

Клас $F[*]$ детермінованої функції від корисного цифрового сигналу, шуму та завади, який вважається відомим і являє собою адитивну суміш корисного сигналу з шумом вигляду

$$u(t) = \theta c(t, \lambda) + n(t) + \eta(t) \quad (5)$$

або

$$u'(t) = (1 - \theta)c_0(t, \lambda_0) + \theta c_1(t, \lambda_1) + n(t) + \eta(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (6)$$

де θ – випадкова величина, яка приймає з ймовірністю p_1 значення $\theta=1$ у разі наявності корисного сигналу $c(t, \lambda)$ згідно з виразом (5) або $c_1(t, \lambda_1)$ згідно з виразом (6) і з ймовірністю $p_0 = 1 - p_1$ у разі відсутності сигналу $c(t, a)$ в суміші (5) або наявності лише сигналу $c_0(t, \lambda_0)$ в комбінації (6).

Отже, конкретна реалізація випадкового процесу на вході ВТС може бути за виразом (5) сумішню переданого сигналу, що відповідає символу «1», і шуму з завадою:

$$u(t) = c(t, \lambda) + n(t) + \eta(t), \theta = 1; \quad (7)$$

а згідно з виразом (6) – комбінацією переданого сигналу $c_1(t, \lambda_1)=1$ і шуму з завадою:

$$u'(t) = c_1(t, \lambda_1) + n(t) + \eta(t), \theta = 1; \quad 0 \leq t \leq T; \quad (8)$$

або згідно з виразом (7) – тільки шумом з завадою:

$$u(t) = n(t) + \eta(t), \theta = 0, \quad (9)$$

а згідно з виразом (6) – комбінацією корисного сигналу $c_0(t, \lambda_0)$, який відповідає символу “0”, з шумом і завадою:

$$u(t) = c_0(t, \lambda_0) + n(t) + \eta(t), \theta = 0, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (10)$$

Введемо до розгляду визначення функції регулярності двох випадкових подій, які взаємно виключають закон третього зайвого (словесний вираз функції ”ЗАВЖДИ”):

$$f[c(t, \lambda)] = c(t, \lambda) + \overline{c(t, \lambda)} = 1; \quad \overline{c(t, \lambda)} = 0, \quad c(t, \lambda) = 1 \quad (11)$$

або

$$\begin{aligned} f[c_0(t, \lambda), c_1(t, \lambda)] &= c_0(t, \lambda_0) + c_1(t, \lambda_1) = 1; \\ c_0(t, \lambda_0) = 0, c_1(t, \lambda_1) = 1; c_0(t, \lambda_0) &= \overline{c_1(t, \lambda_1)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вимагається найбільш “чисто” виділити переданий сигнал $c(t, \lambda)$ або $c_0(t, \lambda_0) \setminus c_1(t, \lambda_1)$ на фоні випадкового шуму і завади та прийняти рішення, який символ цифрової послідовності на вході ВТС у цій реалізації має місце («1» чи «0»), тобто прийняти одне з двох рішень, що взаємно виключаються, де має місце випадок (7), (9) або (8), (10), відповідно; після чого на основі функції регулярності (11) чи (12) виділити регулярну складову ЦСЕ і за нею сформувати ТСС так, як це показано було вище.

У виразах (4) – (12), окрім розшифрованих в тексті термінів, позначено: $c(t, \lambda)$ – корисний цифровий сигнал, який є детермінованою і відомою функцією параметрів t і λ ; λ – вектор параметрів сигналу; $\lambda = \{ \lambda_1, \dots, \lambda_m \}$; t – поточний час.

4. Алгоритм функціонування і технічна реалізація завадостійкого ВТС цифрових телекомунікаційних систем

Широко відомі теорія прийняття статистичних рішень і добре розвинуті на її основі методи оптимального радіоприйому, що використані при розробці теоретичного вибору статистичного критерію оптимального виділення ТСС із інформаційного ЦСЕ.

Поняття середнього ризику прийняття правильних рішень при виділенні ТСС із інформаційного ЦСЕ обґрунтовується у вигляді

$$\begin{aligned} \overline{r_{вид}} &= r_{01} p(c_1) p(d_0/c_1) + r_{00} p(c_0) p(d_0/c_0) = r_{01} p(c_1) D_{01} + r_{00} p(c_0) D_{00} = \\ &= r_{01} p(c_1) (L_0 D_{00} + D_{01}) = r_{01} p(c_1) (1 - D_{11} + L_0 D_{00}) = r_{01} p(c_1) [1 - (D_{11} - L_0 D_{00})], \end{aligned} \quad (13)$$

де $L_0 = r_{00} \cdot \frac{p(c_0)}{r_{01}} \cdot p(c_1)$ – ваговий множник виявлення; D_{00} – ймовірність правильного не-

виявлення корисного сигналу, $D_{00} = p(d_0/c_0)$.

Як критерій оптимального виділення, згідно з виразом (13) визнано ваговий, тобто максимізація вагової різниці (вираз, який заключається в круглі дужки формули (13)), а саме:

$$D_{11} - L_0 D_{00} \Rightarrow \text{макс}, \quad (14)$$

що, очевидно, призводить до мінімізації середнього ризику як найбільш загального статистичного критерію оптимальності:

$$\bar{r}_{\text{свд}} \Rightarrow \text{мін}. \quad (15)$$

Відповідно до розглянутого, в оптимальний алгоритм видільника ТСС (ВТС) закладені такі передумови:

– процедура оптимальної обробки ЦСЕ на основі статистичної теорії прийняття рішень, в результаті якої виділяється регулярна складова ЦСЕ (первинна обробка сигналу). Схемотехнічна реалізація цієї процедури отримала назву видільника регулярної складової (ВРС);

– процедура оптимізації за швидкодією системи фазового автопідстроювання частоти (СФАПЧ) з використанням принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна.

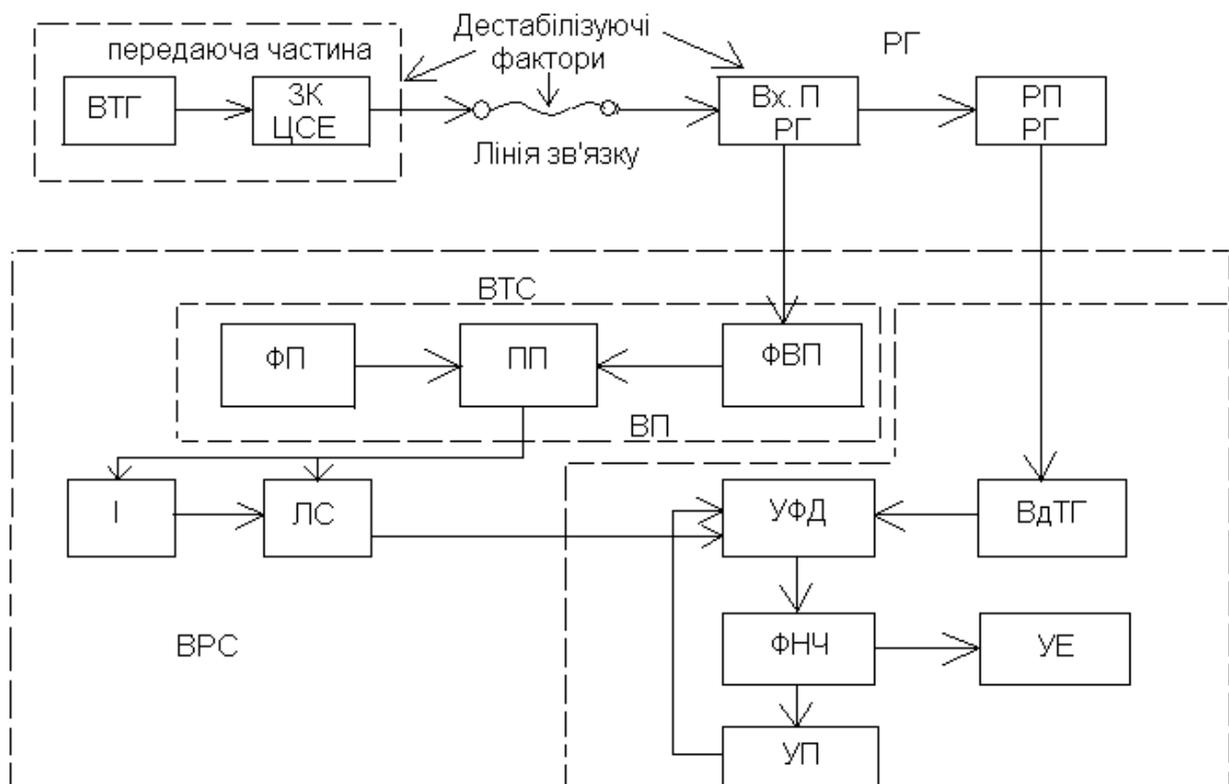


Рис. 3. Функціональна схема оптимального ВТС

В реалізацію оптимального алгоритму функціонування ВТС необхідно включати: 1) вхідні пристрої (ВП) для підключення ВТС до регенератора або приймача ЦСПІ; 2) ВРС для виділення регулярної складової, яка скрита у випадковому ЦСЕ; 3) СФАПЧ для зрівняння сигналів з виходу ВРС і веденого тактового генератора (ВдТГ) та автопідстроювання фази його сигналу під фазу сигналу з виходу ВРС. Схемотехнічна реалізація такого оптимального ВТС показана на рис. 3. Випадковий ЦСЕ формується у загальному каналі (ЗК) під дією ведучого тактового генератора (ВТГ) і поступає в лінію зв'язку. Вхідний пристрій регенератора або приймача ЦСПІ (Вх.П РГ) виконує попередню обробку ЦСЕ в блоці ФВП. Він подається на пороговий пристрій (ПП), на виході якого приймається рішення про наявність символу $d_1 = 1$ у випадковій імпульсній послідовності ЦСЕ або про його відсутність ($d_0 = 0$). В подальшому після інверсії в блоці І та

об'єднанні в блоці логічного сумування (ЛС) виділяється регулярна складова ЦСЕ. Блок І та ЛС становлять ВРС. В УФД виконується порівняння сигналів з виходу ВРС і ВдТГ. Якщо виявлено розходження їх фаз, то формується сигнал, пропорційний до цього розходження, який проходить через фільтр нижніх частот (ФНЧ), та управляючий елемент (УЕ) і підстроює фазу сигналу ВдТГ під фазу сигналу, який знімається з виходу ВРС. Управляючий пристрій (УП), який являє собою логічний обчислювальний блок, на основі обробки контрольованих значень фазової помилки та її похідних виробляє сигнал управління характеристикою УФД, чим і забезпечується протікання оптимальних за швидкодією режимів перехідних процесів. Виділений ТСС поступає на вирішальний пристрій регенератора (РП РГ).

Висновки

Виконано порівняльний аналіз теоретичних методів виділених тактових синхросигналів цифрових телекомунікаційних систем, на базі якого обґрунтовано необхідність завадостійкого виділення ТСС для сучасного цифрового обладнання телекомунікацій.

Запропоновано оригінальну перспективну технологію обробки ЦСЕ з метою завадостійкого виділення ТСС із інформаційного, як таку, що використовує видільник регулярної складової ЦСЕ, який приходить з лінії зв'язку (первинна обробка), та накопичувач, який являє собою систему фазового автопідстроювання (вторинна обробка). ВРС створено на основі теорії прийняття оптимальних рішень, а СФАПЧ синтезовано на основі принципу максимуму і є оптимальною за швидкодією.

Побудовано алгоритм функціонування видільника тактового синхросигналу та запропоновано варіант його схемотехнічного втілення.

1. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи / Пер. с англ. – М., 2003.
2. Борщ В.И., Гайдар В.П., Коваль В. В., Лесовой И. П. Тактовая синхронизация в интегральных цифровых сетях электросвязи. – К., 1998.
3. Емельянов Г.А., Шварцман В.О. Передача дискретной информации. – М., 1982.
4. Гуров В.С. и др. Основы передачи данных по проводным каналам связи. – М. 1964.
5. Баева Н.Н. и др. Основы многоканальной связи. – М., 1975.