

УДК 621 391 006

ПРИНЦИПИ УЗГОДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ТРАНСПОРТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

DOI 10.36994/2788-5518-2021-02-02-05

Бірюков М.Л., к.т.н., с.н.с. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, nlbir2@ukr.net

Семенко А.І., д.т.н., проф. Відкритий міжнародний університет розвитку людини “Україна”, Київ, Україна, setel@ukr.net

Тріска Н.Р., к.т.н., с.н.с. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ntriska@ukr.net

Анотація. В статті узагальнено та систематизовано основні підходи до вирішення проблеми узгодження швидкостей цифрових потоків в сучасних телекомунікаційних мережах. Відзначено велику роль методів узгодження (зокрема, цифрового вирівнювання асинхронних цифрових потоків, а також впровадження мережевої синхронізації) у забезпеченні високих якісних показників роботи телекомунікаційної мережі. Розглядаються засоби запобігання проскакування у транспортних телекомунікаційних мережах. Основний предмет розгляду зосереджено на механізмах узгодження швидкостей цифрових потоків, їх чисельних показниках та розрахункових співвідношеннях в умовах об'єднання/мультиплексування цифрових потоків. Зокрема, проаналізовано узгодження швидкостей потоків методом вставок, указників та переривання повідомлень пакетами. Узагальнені правила ілюструються конкретними прикладами узгодження швидкостей в обладнанні плезіохронної та синхронної цифрової ієрархії.

Ключові слова: телекомунікаційна транспортна мережа, об'єднання/мультиплексування цифрових потоків, вирівнювання, узгодження швидкостей цифрових потоків, керовані/некеровані проскакування, плезіохронний/синхронний режим мережі, синхронний/асинхронний спосіб передавання.

ALIGNMENT OF THE TRANSPORT NETWORK DIGITAL STREAMS

Nikolai Biriukov, Ph.D. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, nlbir2@ukr.net

Anatoly Semenko, Dr. habil., Prof. Open University of Human Development “Ukraine”, Kyiv, Ukraine, setel@ukr.net

Natalia Triska, Ph.D. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, ntriska@ukr.net

Abstract. The article deals with the slip prevention means in the transport telecommunication networks, specifically during multiplexing of the tributary digital signals. The general classification of network modes and transmission modes is presented to explain the digital streams alignment problem and its solutions in different network environment. This analysis is focused on the digital streams rate adjustment including quantitative measures and equations for estimation of adjustment processes. Specifically, the maximum adjustment rate and the adjustment coefficient are defined. The general model of digital streams interaction in the multiplexing/demultiplexing systems is based on the processes of data writing and reading in the elastic memory. The tributary digital streams can be multiplexed in an asynchronous (PDH) or synchronous (SDH) way, and in both cases the problem of digital signals alignment should be solved. The main alignment methods are analysed such as bit/byte adjustment (stuffing) and pointers in the case of synchronous transmission mode (PDH/SDH networks) as well as packet stream interruption in the case of asynchronous transmission mode. The advantages and disadvantages of asynchronous and synchronous transmission modes are analysed in the context of transmission performance, including the network aspects (deployment of synchronization network as a mean of slip prevention). The general rules have been illustrated by practical examples describing the main digital streams alignment methods widely used in PDH/SDH transmission equipment in detail. The directions of further studies in the field of digital signals alignment and slip prevention are outlined.

Keywords: transport telecommunication network, multiplexing of digital streams, alignment, digital streams rate adjustment, controlled/uncontrolled slip, plesiochronous/synchronous network mode, synchronous/asynchronous transmission mode.

Вступ

У даній роботі розглядаються особливості основних підходів до узгодження цифрових потоків транспортної телекомунікаційної мережі (ТТМ) з метою запобігання проскакування в основних режимах роботи ТТМ.

Основні режими та стани ТТМ мають неоднозначне трактування і в даній роботі визначення використовуються у наступному сенсі [1-3, G.701, G810, G.822]:

Синхронна мережа (СМ), або синхронний режим роботи, коли усі елементи мережі (ЕМ) примусово відстежують частоту одного провідного джерела робочої нормованої тактової частоти (ТЧ) f_0 , що, як правило, має вищу точність;

Плезіохронна мережа (ПМ), або плезіохронний режим, у якому усі ЕМ працюють від різних джерел ТЧ f_0 у межах припустимого нормованого відхилення $\pm \Delta f$;

Асинхронний стан мережі, у якому ЕМ працюють від джерел довільної точності;

Синхронний спосіб передавання (ССП) має відношення до каналного рівня взаємодії телекомунікаційних систем, і, як правило, означає передавання фрагментів інформації тільки у визначені часові інтервали, наприклад, у складі періодичної послідовності з визначеними часовими межами початку та кінця, тощо. Це також означає, що у процесі передавання

джерело та приймач інформації певним чином синхронізовані (наприклад цикловою синхронізацією).

Асинхронний спосіб передавання (АСП), коли інформаційні джерела взаємно асинхронні, незв'язані, а фрагменти інформації мають передаватись у довільні незалежні моменти часу на розсуд інформаційного джерела.

Узгодження швидкостей потоків цифрової інформації – цифрових потоків (ЦП) необхідне, головним чином, у ССП в умовах ПМ. У цих умовах невизначеної розбіжності ТЧ джерела та приймача, відмінність тактових частот запису та зчитування на стиках між пристроями, веденими від різних генераторів, призводить до збоїв процесу запису та зчитування, які проявляються у вигляді проскакування. Проскакування – це втрата або повторення фрагменту цифрового потоку: біта, байта або цикла, пакета чи чарунки (АТМ – asynchronous transfer mode) даних [4]. Проскакування відбувається через неузгодженість швидкостей запису та зчитування на стику елементів мережі, які керуються від незв'язаних несинхронізованих між собою генераторів, тобто в плезіохронному режимі роботи мережі.

Частота проскакувань є одним з базових показників якості роботи цифрової системи передавання, тому цій темі приділено багато уваги в літературі, зокрема, в роботах [3, 5, 7] та інших, де детально проаналізовано механізми виникнення проскакувань, визначено їх кількісні показники та залежність від точності тактової частоти, а також запропоновано ймовірнісний підхід до аналізу проскакувань.

В даній роботі основну увагу приділено базовим принципам узгодження швидкостей цифрових потоків в ТТМ, а саме односторонньому та двосторонньому вирівнюванню та методу указівників, як засобам запобігання проскакувань в цифрових системах плезіохронної та синхронної цифрової ієрархії. В контексті даної роботи АРП в стані ПМ, СР мережі, її частин або напрямків, а також передавання інформаційного блоку пакетами можна розглядати як засіб протидії проскакуванню.

Основні підходи до узгодження цифрових потоків в умовах плезіохронної мережі

В сучасних цифрових системах та мережах зв'язку для узгодження та/або згладжування розбіжності ЦП з різними ТЧ застосовують різні методи, які умовно можна розділити на немережеві та мережеві.

До немережевих методів узгодження ЦП відносять:

буферизацію (використання еластичної пам'яті – буферного запам'ятовуючого пристрою (БЗП) необхідної ємності в обладнанні систем передавання та комутації з ССП та АСП;

узгодження швидкостей під час обробки плезіохронних сигналів (в системах передавання з ССП – PDH та SDH);

відстеження тактової частоти в напрямку передавання в системах з ССП (лінійні тракти PDH, шлейфи ЦАТС тощо) та АСП (синхронний Ethernet, утворення тимчасових з'єднань, "тунелей", емуляція каналів); пакетне передавання (обмеження тривалості неперервного передавання в мережах з АСП, тобто тривалість до можливого проскакування; переприймання по тактовій частоті – ретаймінг з підвищенням якості тактової частоти (в обладнанні систем передавання та комутації з ССП та АСП). Усі немережеві методи вирішують задачу обмеження тривалості неперервного передавання, тобто "розрізання" неперервного цифрового потоку на ділянки, тривалість яких не перевищує оцінку інтервалу проскакування. Спосіб обмеження неперервного передавання обирають залежно від того, який спосіб передавання використовується на каналному рівні – синхронний чи асинхронний.

В разі ССП блоків інформації в реальному масштабі часу виконують пряме та зворотне узгодження у практично неперервному потоці (прикладом можуть слугувати процедури узгодження швидкостей компонентних потоків в ЦСП PDH та SDH).

В разі АСП цифровий потік попередньо розбивають на фрагменти різної довжини (пакети), і передавання пакетів здійснюють у відносному масштабі часу, що є прийнятним для передавання даних, не критичних до затримок та/або дисперсії часу. В результаті тривалість сеансу неперервного передавання виявляється меншою за період розходження частот. Однак розкид часу відправлення та приймання пакетів, а також можливе виникнення черг під час запису та зчитування призводять до відповідного розкиду затримок, вимоги до яких для деяких послуг на 2 порядки величин жорсткіші, ніж сама величина затримки.

Мережевий метод запобігання проскакування – це створення мережі тактової мережевої синхронізації (ТМС), в якій наслідки неузгодженості знижуються до прийнятного рівня за рахунок підтримання високої точності та стабільності тактової частоти в усіх елементах мережі. Даний метод широко застосовується як у "класичних" мережах з ССП, так і в сучасних пакетних мережах з АСП для підвищення якості певних завдань, наприклад, синхронний Ethernet (SyncE).

Застосування тих чи інших методів запобігання проскакування залежить від використовуваного способу передавання (ССП чи АСП), конкретних технологій передавання та комутації, а також від місця виникнення проскакування – в межах окремого цифрового вузла або пристрою, під час обробки сигналів в обладнанні системи передавання або в масштабі всієї мережі чи її великих фрагментів (наприклад, проскакування в процесі взаємодії цифрових АТС).

Далі більш детально розглядеться один з перерахованих вище немережевих методів, а саме узгодження швидкостей плезіохронних ЦП під час мультиплексування.

Узагальнена модель взаємодії цифрових потоків в системах мультиплексування

Дана модель охоплює приклади об'єднання, мультиплексування декількох ЦП (компонентних сигналів) в один ЦП вищої ієрархії (груповий сигнал) – рис. 1. Операція об'єднання декількох цифрових потоків в транспортних телекомунікаційних системах називається групоутворенням або мультиплексуванням [1, 7, 8]. В системах передавання плезіохронної цифрової ієрархії – ПЦІ та синхронної цифрової ієрархії – СЦІ усі ступені вище першої формуються шляхом об'єднання одночасно поступаючих чотирьох ЦП певної швидкості (нижчого рівня) в один ЦП з послідовним чергуванням символів, біт або байт.

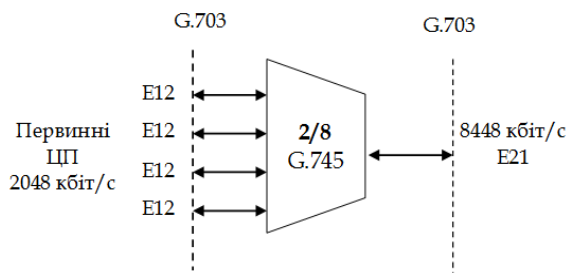


Рис. 1. Приклад об'єднання/мультиплексування чотирьох первинних ЦП 2048 кбіт/с (E12) у один вторинний ЦП 8 448 кбіт/с (E22)

В загальному випадку розрізняють [1, 2]:

- синхронне цифрове мультиплексування, коли компонентні сигнали вважаються синхронними а швидкість групового сигналу становить $B = n \cdot b$, біт/с (де n – кількість компонентних сигналів, а b – швидкість компонентного сигналу). Прикладами таких систем є первинний ІКМ-мультиплексор та обладнання СЦІ. При синхронному мультиплексуванні тривалість циклу об'єднання є постійною (так, на всіх ієрархічних рівнях СЦІ тривалість циклу становить 125 мкс);

- асинхронне цифрове мультиплексування, коли компонентні сигнали є плезіохронними (як, наприклад, в системах ПЦІ), тобто їх швидкості можуть відрізнятися між собою та від частоти, що генерується пристроєм об'єднання. В результаті в обладнанні мультиплексування виникають проскакування, для боротьби з якими застосовують методи узгодження швидкостей компонентних потоків шляхом цифрового вирівнювання.

В основі взаємодії цифрових потоків лежить базовий елемент тракту передавання в плезіохронній мережі (рис. 2), який входить до структур мультиплексування/ демultipлексування, АЦП/ЦАП, комутаторів та маршрутизаторів. Базовий елемент наочно ілюструє так звану “проблему двох генераторів” – розходження між частотами запису сигналу до буферної (еластичної) пам'яті (ClkWr) та зчитування з неї (ClkRd), що формуються двома незалежними непов'язаними між собою генераторами (G1 та G2).

Проскакування, що виникають через розходження цих частот, називають некерованими, маючи на увазі, що такі проскакування можуть виникнути будь-коли і порушити цикловий синхронізм. Пристрій відновлення тактової частоти (на схемі рис. 2 позначений як CR – Clock Recovery) та фазовий компаратор дозволяють зробити проскакування контрольованими, тобто передбачати моменти їх появи, а система керування узгодженням (P/KY) забезпечує вчасне використання механізмів вирівнювання, тобто проскакування стають керованими.

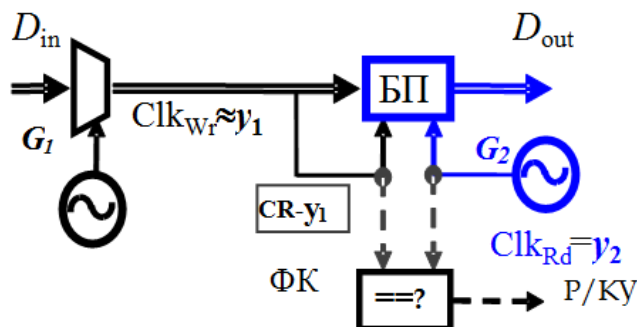


Рис. 2. Базовий елемент у структурі мультиплексування ЦП (рис. 1):

D_{in} – вхідний потік даних, D_{out} – вихідний потік даних, CR – схема виділення тактової частоти (ВТЧ), ФК – фазовий компаратор, Clk_{Rd} – тактовий сигнал зчитування, БП – буферна пам'ять, Clk_{Wr} – тактовий сигнал запису, P – реєстрація проскакування / KY – керування узгодженням вхідного сигналу

Таблиця 1.
Класифікація типів вирівнювання

Умова		Тип вирівнювання
1	$fW + \Delta fW < fR - \Delta fR$	+ / – додатнє (positive stuffing, positive justification)
2	$fW - \Delta fW > fR + \Delta fR$	– від'ємне (negative stuffing, negative justification)
3	$fW \pm \Delta fW \approx fR \pm \Delta fR$	+ / 0 / – додатнє, нуль, від'ємне

Основна ідея цифрового вирівнювання полягає в тому, щоб переписати цифровий потік з іншою швидкістю (потрібною для подальшої обробки цього потоку, наприклад, у системах мультиплексування) без втрати інформації. В таблиці 1 наведено класифікацію типів вирівнювання для вхідних ЦП зі швидкістю запису $fW \pm \Delta fW$ та швидкістю зчитування $fR \pm \Delta fR$. Якщо частота запису fW менше частоти зчитування fR , то у груповому ЦП виникають прогалини, тому у компонентні ЦП вставляють додаткові символи. Такий спосіб зветься додатнім або позитивним вирівнюванням чи узгодженням. Якщо $fW > fR$, то “зайві” символи вилучаються та передаються на окремих

позиціях групового ЦП. Такий процес зветься від'ємним або негативним вирівнюванням. У випадку застосування обох методів (додатного та від'ємного) вирівнювання зветься двостороннім.

Внаслідок розбіжності тактових частот запису та зчитування у загальному випадку накопичується розбіжність між значущими моментами запису та зчитування в часі. Помилка часового інтервалу $x(t)$ (відхилення фази сигналу за період часу t) становить [1]:

$$x(t) = y_0 t + D t^2 / 2 + \varepsilon(t), \quad (1)$$

де $y_0 = \pm \Delta f / f_n$ – початкове зміщення частоти, тобто нормоване відхилення Δf поточного значення частоти f_0 від її номінального значення f_n (в даному випадку під відхиленням Δf слід розуміти початкове розходження тактових частот запису f_W та зчитування f_R);

D – дрейф частоти (параметр, що характеризує тривалу стабільність пристроїв та сигналів синхронізації);

$\varepsilon(t)$ – випадкові шуми, що впливають на тактові сигнали.

Зазвичай на практиці достатньо оцінки в першому наближенні – за рахунок розходження (різниці) частот запису та зчитування (без урахування впливу шумів та дрейфу частоти), а тільки за умови зсуву частот [2]. Тому в подальшому розглядатиметься лише перший член виразу (1).

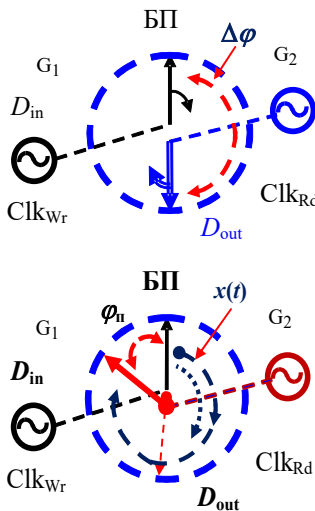
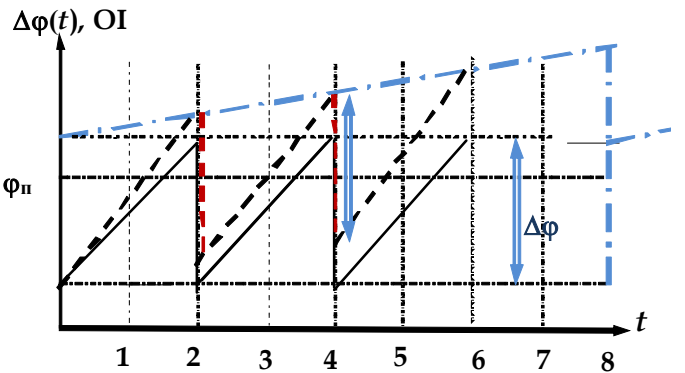


Рис.3. Логічна модель

БП:

а) $f_W = f_R$; б) $f_W < f_R$



Моменти цифрового вирівнювання, цикли

φ_{π} поріг, при якому виникає необхідні вирівнюванні

$\Delta\varphi_{\text{в}}$ зсув фази, внаслідок цифрового вирівнювання

Рис. 4. Діаграма розбіжності моментів

запису/зчитування та вирівнювання швидкостей ЦП:

$f_W = f_R$; $f_W < f_R$

Величина відхилення фази $x(t)$ може виходити за припустими межі інформаційного сигналу (біта, байта, пакету, циклу) або ж навпаки, більше одного разу потрапляти в ту саму область під час зчитування, що і призводить до виникнення проскакування. Межі відхилення фази, наприклад, при

зчитуванні бітів, не повинні перевищувати виправляючої здатності приймача, яка становить порядку 40 % ОІ.

За умов наявності буферної пам'яті (рис. 2) розбіжність фаз запису та зчитування не має перевищувати певну захисну межу, яка захищає БП від перевантаження або вичерпання. На рис. 3 показано логічну модель БП, а на рис. 4 – діаграму розбіжності частот.

При об'єднанні декількох ЦП у один груповий ЦП з додатнім узгодженням мають виконуватися, принаймні, дві вимоги [2]:

У циклі групового ЦП повинно бути достатньо місця для вхідних потоків за будь-якого максимального відхилення частоти. За визначенням, це умова 1 в табл. 1.

Максимальна потреба у вирівнюванні має бути менше максимальної частоти вирівнювання. Оскільки максимальна частота вирівнювання в ССП дорівнює частоті циклів, то це означатиме:

$$\Delta f_{\max} = (f_W + \Delta f_W) - (f_R - \Delta f_R) < f_{\text{гцп}} / N_{\text{гцп}}, \quad (2)$$

де f_W , f_R , Δf_W , Δf_R – номінальні значення частоти запису та зчитування компонентного ЦП та їх припустимі відхилення, відповідно; $f_{\text{гцп}}$, та $N_{\text{гцп}}$ – номінальна частота та кількість біт у груповому ЦП.

Наприклад, для ЦП E21 $f_{\text{гцп}} = 8448$ кГц, $N_{\text{гцп}} = 848$ біт, тому відношення $f_{\text{гцп}}/N_{\text{гцп}} \approx 10$ кГц, а максимальна розбіжність $\Delta f \approx 200$ Гц.

Взаємодія компонентних та групового ЦП характеризується номінальними та максимальними значеннями коефіцієнтів (justification ratio) або частотою узгодження (justification rate) [4]. Коефіцієнт узгодження ρ та номінальний коефіцієнт узгодження $\rho_{\text{ном}}$ для додатного вирівнювання (табл. 1) визначаються по відношенню фактичної f або номінальної частоти $f_{\text{ном}}$ узгодження до максимальної частоти узгодження, яка, як правило, дорівнює частоті циклів:

$$\rho_{\text{ном}} = f_{\text{ном}} / f_{\text{ц}}, \quad (3a)$$

або:

$$\rho_{\text{ном}} = \Delta f_{\text{ном}} / F_{\text{sl max}} = \Delta f_{\text{ном}} \cdot T_{\text{ц}}, \quad (3b)$$

де $f_{\text{ном}}$ – номінальна частота узгодження, в загальному випадку;

$f_{\text{ц}}$ – номінальна частота циклів;

$\Delta f_{\text{ном}}$ – розбіжність частот запису та зчитування (2) на один ЦП;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість циклу: $T_{\text{ц}}/f_{\text{ц}}$;

$F_{\text{sl max}}$ – максимальна частота вирівнювання (вставок), яка зазвичай дорівнює частоті циклів $f_{\text{ц}}$.

Слід зазначити, що розбіжність частот $\Delta f_{\text{ном}}$ у виразі (3) за своїм фізичним змістом аналогічна помилці часового інтервалу $x(t)$ у виразі (1). Обидва вирази описують процес накопичування відхилення частоти/фази внаслідок розбіжності тактових частот запису та зчитування.

На рис. 3а показано вихідне положення указників запису та зчитування, яке залишається незмінним за умови $f_W = f_R$; на рис. 4 для цього випадку

показана регулярна послідовність на два цикли вирівнювання: $\rho_{ном} = 1/2$ та $\varphi(t) = \rho \cdot t$. На рис. 3б показано положення указників запису та зчитування $f_W < f_R$, коли зчитування випереджує запис, та відстань між указниками близька до припустимого порогового значення φ_p .

Таким чином, проблема узгодження цифрових потоків (тобто вирівнювання їх швидкостей) виникає в процесі об'єднання ЦП, наприклад, при формуванні різних цифрових ієрархій (ПЦІ, СЦІ) або в разі “зустрічної роботи”, коли на приймальній стороні частота відліків генератора не співпадає з частотою вхідного ЦП. Нижче розглянемо на конкретних прикладах основні механізми узгодження ЦП, що знайшли широке застосування у ТТМ:

- вирівнювання (додатне, від'ємне або двостороннє) в системах передавання ПЦІ, а також при розміщенні асинхронних компонентних потоків в структурі сигналу СЦІ;
- використання указників в обладнанні СЦІ.

Вирівнювання швидкостей компонентних потоків в системах ПЦІ/СЦІ

Вирівнювання швидкостей, основні принципи якого було розглянуто вище, широко застосовується в цифрових системах передавання при об'єднанні компонентних ЦП у груповий потік.

В якості прикладу розглянемо вторинне мультиплексування, коли чотири первинних цифрових потоки 2048 кбіт/с (E12) об'єднуються у вторинний цифровий потік 8448 кбіт/с (E21) з використанням одного з двох варіантів вирівнювання швидкостей:

- додатнє вирівнювання (згідно Рекомендації ITU-T G.742);
- двостороннє вирівнювання (згідно Рекомендації ITU-T G.745).



Рис. 5. Параметри циклу вторинного ЦП з додатнім вирівнюванням (G.742)

В табл. 2 узагальнено інформацію про структуру циклу та параметри вирівнювання в системах вторинного мультиплексування з додатнім вирівнюванням (згідно G.742), а на рис. 5 схематично представлено структуру

циклу вторинного ЦП 8448 кбіт/с. З табл.1 можна бачити, що максимальна швидкість вирівнювання на кожну первинну систему при додатному вирівнюванні становить 10 кбіт/с. Номінальний коефіцієнт вирівнювання, що дорівнює відношенню максимальної та номінальної швидкостей вирівнювання, становить 2,36.

Оцінімо чисельні показники додатного вирівнювання в системі вторинного мультимплексування (табл. 2, рис. 5). Визначимо максимально допустимий розмах девіації (відхилення) частоти Δf компонентного потоку E12 (2048 кбіт/с) при асинхронному узгодженні з вирівнюванням біт, якщо в кожному циклі для узгодження виділено 1 біт. Іншими словами, необхідно визначити різницю між максимальною та мінімальною частотою компонентного потоку E12 під час формування групового сигналу E21.

Таблиця 2.
Структура циклу вторинного ЦП (8448 кбіт/с)

Швидкість передавання вхідних ЦП E12 (кбіт/с)	2048 $\pm$ 30 10-6
Кількість вхідних ЦП E12	4
Структура циклу	
Цикловий синхросигнал (1111010000/10111000)	I група
Біт аварії дального кінця – АДК	1 – 10
Біт, зарезервований для національних мереж – Н	11
Інформаційні біти – І	12
	13 – 212
Біти управління вирівнюванням (стафінгу) Cj1	II група
Інформаційні біти – І	1 – 41)
	5 – 212
Біти управління вирівнюванням (стафінгу) Cj2	III група
Інформаційні біти – І	1 – 4
	5 – 212
Біти управління вирівнюванням (стафінгу) Cj3	IV група
Інформаційні символи вхідних ЦП E1 при додатному вирівнюванні ІБ+	1 – 4
Інформаційні біти	5 – 8
	9 – 212
Довжина циклу, біт	848
Тривалість циклу, мкс	100,38
Кількість біт в групі (субциклі)	206
Тривалість групи (субциклу), мкс	25,09
Тривалість одиничного тактового інтервалу ОІ (період тактової частоти), нс	118,4
Максимальна частота вирівнювання, кбіт/с	9,96
Коефіцієнт вирівнювання	0,424

Цикл E21 складається з 848 біт. Номінальна швидкість вторинного групового ЦП становить 8448 кбіт/с. Номінальна швидкість слідування циклів дорівнює $f_c = 8448 \text{ [кбіт/с]} / 848 \text{ [біт]} \approx 9,962 \text{ кГц}$ і визначає максимальну

швидкість вирівнювання, тобто ту кількість біт компонентного потоку, яку можна передати на позиціях узгоджуваних бітів.

Використовуючи вирази (3), оцінимо коефіцієнт вирівнювання. У режимі номінальної частоти $\Delta f_{\text{ном}} = f_{R\text{ном}} - f_{W\text{ном}}$. Номінальна частота запису ЦП E12 у БП дорівнює $f_{W\text{ном}} = 2,048$ МГц, а частота зчитування $f_{R\text{ном}}$ кожного ЦП E12 з 206 біт за 1 цикл становитиме $f_{R\text{ном}} = 2,0522$ МГц, тобто $\Delta f_{\text{ном}} = 4,23$ кГц. Коефіцієнт узгодження (3) дорівнює $r_{\text{ном}} = \Delta f_{\text{ном}} \cdot T_{\text{ц}} = 0,424$, це приблизно 1 вставка на 2,3 циклу.

Потенційна можливість вирівнювання становить: $\Delta f_{\text{ном}}/f_{R\text{ном}} \approx 200$ ppm.

Порівнюючи отримане значення з визначеним у Рекомендації ITU-T G.703 допустимим відхиленням частоти ± 50 ppm для ЦП E12 (що відповідає $\approx \pm 100$ Гц,) та ± 30 ppm для ЦП E22 (що відповідає $\approx \pm 250$ Гц), можна бачити, що максимальне відхилення може становити близько 350 Гц, а потенційні можливості вирівнювання (4,23 кГц) перевищують це значення більш ніж на порядок.

При максимальному розходженні частот $(f_W - \Delta f_W) - (f_R + \Delta f_R)$ максимальна частота розбіжності становить $\Delta f_{\text{max}} \approx 4,39$ кГц, а коефіцієнт вирівнювання $r_{\text{max}} \approx 0,44$.

Аналогічні процеси відбуваються під час розміщення асинхронних компонентних потоків в структурі сигналу СЦІ для формування синхронного транспортного модуля STM-1 і подальшого синхронного мультиплексування згідно ієрархії СЦІ. В якості прикладу на рис. 6 представлено схему асинхронного завантаження потоку 2048 кбіт/с у віртуальні контейнери VC-12.

Використання указівників в обладнанні СЦІ

Указівники компонентних та адміністративних блоків (TU PTR та AU PTR відповідно) виконують в технології СЦІ дві основних функції:

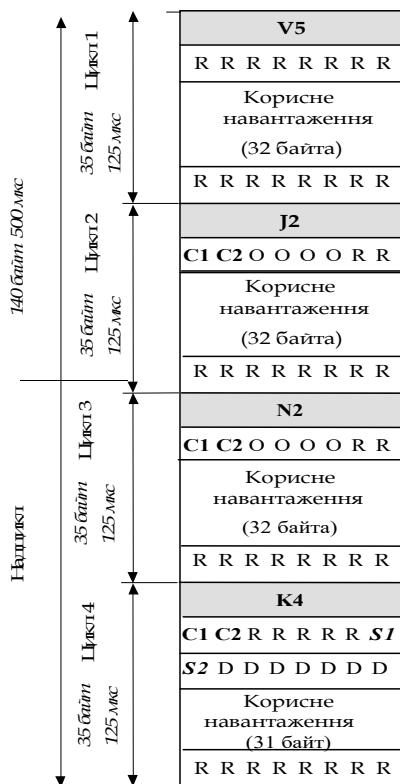
- забезпечення швидкого пошуку та доступу до навантаження;
- забезпечення процедур узгодження швидкостей компонентних ЦП.

В якості прикладу розглянемо узгодження швидкостей за допомогою указівника компонентного потоку TU-12 з використанням процедур додатного та від'ємного вирівнювання.

Після формування надциклу VC-12 довжиною 140 байтів (див. рис. 6) до нього додаються 4 байти указівників (V1, V2, V3, V4), тобто кожний віртуальний контейнер VC-12 перетворюється на компонентний блок TU-12 довжиною 36 байтів. В результаті формується надцикл TU-12 з періодом повторення 500 мкс та загальною довжиною 144 байти.

В кожному надциклі TU-12:

- два перших байта (V1 та V2) утворюють кодове слово указівника (рис. 7);
- байт V3 використовується для узгодження швидкостей (вирівнювання);
- байт V4 є резервним.



Віртуальний контейнер VC-12 має ємність 35 байт (34 байта контейнера C-12 + 1 байт заголовку VC-12 РОН). Надцикл VC-12 має період повторення 500 мкс і загальну довжину 140 байт ($35 \times 4 = 140$). Початкова фаза надциклу VC-12 визначається байтом індикатора положення навантаження (Н4) у заголовку РОН контейнера верхнього рівня (VC-4). В надциклі кожний VC-12 має заголовок довжиною в 1 байт (байти V5, J2, N2, K4 для циклів 1, 2, 3, 4 відповідно).

Узгодження швидкостей (вирівнювання) здійснюється наступним чином:

Якщо $C1C1C1 = 000$, то S1 – інформаційний біт

Якщо $C1C1C1 = 111$, то S1 – біт вирівнювання

Якщо $C2C2C2 = 000$, то S2 – інформаційний біт

Якщо $C2C2C2 = 111$, то S2 – біт вирівнювання

Рис. 6. Асинхронне завантаження компонентного ЦП 2048 кбіт/с у віртуальні контейнери VC-12:

D – інформаційні біти; R – біти фіксованих вставок; O – біти заголовку (зарезервовані); S – узгоджуючі біти (інформаційні біти або біти вирівнювання, залежно від значень команд C); C – біти команд узгодження швидкостей

Розглянемо призначення бітів, що входять до складу кодового слова указівника (байти V1 та V2).

Біти 7-16 (послідовність I- та D- бітів, що чергуються між собою) в нормальному режимі роботи (тобто за відсутності вирівнювання) утворюють двійкове число, яке вказує кількість байтів між байтом V2 указівника та байтом V5 заголовка першого TU-12. Діапазон величини указівника становить від 0 до 139, а байти указівника не беруться до уваги під час підрахунку. Таким чином, указівник TU-12 PTR забезпечує точну індикацію положення корисного навантаження, що робить можливим "плаваючий режим" розміщення VC-12 в межах надциклу TU-12. На приймальній стороні в разі отримання помилкового (> 139) значення указівника в I- та D- бітах визначеної кількості послідовних надциклів TU-12 приймач генерує аварійний сигнал LOP (Loss of pointer – втрата вказівника).

Біти 5,6 (S-біти) визначають тип корисного навантаження (для VC-12 це комбінація "01").

Біти 1-4 (N-біти) містять флаг (ознаку) нових даних (NDF – New Data Flag). Механізм NDF забезпечує зміну значення указівника в результаті зміни корисного навантаження.

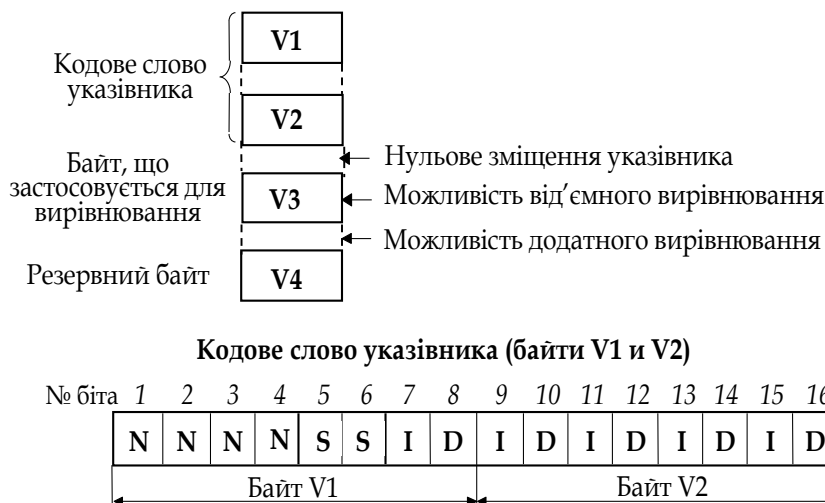


Рис. 7. Структура указівника TU-12

Додатне вирівнювання. Якщо швидкість даних, що приймаються, є нижчою за стандартну, то циклова синхронізація VC-12 повинна періодично проскакувати назад в часі. Це забезпечується наступним чином.

На передавальній стороні:

- Поточне значення указівника передається з інвертованими I-бітами (біти 7, 9, 11, 13 та 15 кодового слова указівника), а байт, що слідує безпосередньо після байту V3 та призначений для додатного вирівнювання, заповнюється "фіктивними" даними.

- Наступні указівники містять попереднє значення указівника, збільшене на одиницю. Якщо попередній указівник мав максимально можливе значення (139), то наступний указівник встановлюється в 0.

- Протягом як мінімум трьох наступних надциклів TU-12 операції зі зміни значення указівника не допускаються.

На приймальній стороні:

- Рішення щодо додатного вирівнювання приймається за принципом більшості, тобто в разі, якщо три I-біти інвертовані, а два неінвертовані, робиться висновок про позитивне вирівнювання. Це забезпечує захист від помилки.

- Якщо прийнято рішення про додатне вирівнювання, то один байт в полі навантаження (той, що слідує безпосередньо за байтом V3) ігнорується приймачем.

Від'ємне вирівнювання. Якщо швидкість даних, що приймаються, є вищою за стандартну, то циклова синхронізація VC-12 повинна періодично проскакувати вперед у часі. Це забезпечується наступним чином.

На передавальній стороні:

- Поточне значення указівника передається з інвертованими D-бітами (біти 8, 10, 12, 14 та 16 кодового слова указівника), а в байт указівника, що призначений для від'ємного вирівнювання (байт V3) завантажуються дані.

- Наступні указівники містять попереднє значення указівника, зменшене на одиницю. Якщо попередній указівник мав значення 0, то наступний указівник буде мати максимально можливе значення (139).

- Протягом як мінімум трьох наступних надциклів TU-12 операції зі зміни значення указівника не допускаються.

На приймальній стороні:

- Рішення щодо від'ємного вирівнювання приймається за принципом більшості, тобто в разі, якщо три D-біти інвертовані, а два неінвертовані, робиться висновок про від'ємне вирівнювання. Це забезпечує захист від помилки, яка могла б призвести до втрати інформації.

- Якщо прийнято рішення про від'ємне вирівнювання, то один байт указівника (байт V3) включається приймачем до складу демультиплексованого навантаження.

Примітка: Значення байта V3, якщо він не використовується для від'ємного вирівнювання, не визначено; приймач повинен ігнорувати це значення.

Послідовні операції вирівнювання за допомогою указівника мають бути відокремлені одна від одної, як мінімум, трьома надциклами TU-12, протягом яких значення указівника не змінюється.

Оцінимо максимально можливу швидкість вирівнювання за допомогою указівника TU-12 у випадку взаємодії двох мультиплексорів СЦІ з генераторами SEC-1 и SEC-2, точність яких становить $\pm 4,6$ ppm. В якості вхідного компонентного сигналу розглядатимемо віртуальний контейнер VC-12 довжиною 140 байт (1120 біт), який вільно зміщується, "плаває" в межах VC-4.

Одна операція вирівнювання за допомогою указівника TU-12 зміщує VC-12 назад або вперед на 1 байт, що еквівалентно 8 біт вхідного потоку VC-12 і, таким чином, відстежує зсув фаз між SEC-1 та SEC-2. Отже, максимальний абсолютний зсув, що відстежується указівником TU-12, дорівнює $\Delta f = \pm 500 \cdot 8 = \pm 4000$ біт/с, що відповідає максимальному зсуву частоти $\Delta f = \text{SEC-1} - \text{SEC-2} = \pm 4$ кГц.

Якщо швидкість потоку VC-12 прийняти приблизно рівною 2,048 Мбіт/с, то відносний зсув $\Delta f/f = \pm 4000/2,048 = \pm 1953$ ppm. Таким чином, можливості указівника набагато перевищують максимально можливе розходження частот

між двома генераторами SEC, яке дорівнює $\pm 9,2$ ppm. Більш точну оцінку можна отримати, розглядаючи значення номінальної швидкості контейнера VC-12 довжиною 35 біт як частину швидкості всього потоку, наприклад, у синхронному транспортному модулі STM-1 (155,52 Мбіт/с) розміром $270 \cdot 9 = 2430$ біт [2]. Отримаємо $f_{VC-12} = \pm 2,24$ Мбіт/с та відносний зсув ± 1785 ppm того ж порядку.

Оцінімо зсув фази, що відповідає одній операції вирівнювання за допомогою указівника TU-12. Зсув фази VC-12 під час вирівнювання за допомогою TU-12 становить 8 біт на швидкості VC-12 $f_{VC-12} = \pm 2,24$ Мбіт/с, що відповідає одиничному інтервалу (OI) 446,43 нс. Таким чином, стрибок фази становить 3,54 мкс. При грубому оцінюванні за тривалістю сигналу E12 (488 нс), отримаємо стрибок фази 3,9 мкс. Як показують розрахунки, якщо генератори SEC-1 та SEC-2 працюють з точністю $\pm 4,6$ ppm, то за одну секунду відбуватиметься ≈ 3 таких стрибки фази, а за одну хвилину, відповідно, ≈ 24 стрибки.

Аналогічні розрахунки для випадку вирівнювання за допомогою указівника AU-4, який зміщує контейнер VC-4 назад або вперед на 3 байти (24 біти), показали, що під час однієї операції вирівнювання стрибок фази становить 160 нс, і відбуваються такі стрибки приблизно 50-60 разів за секунду.

Для зменшення частоти операцій вирівнювання і, відповідно, кількості стрибків фази, які негативно впливають на якість цифрового передавання, необхідно підвищувати точність генераторного обладнання всіх елементів мережі [1]. Так, якщо в розглянутих прикладах точність генераторів SEC-1 та SEC-2 підвищити до ± 10 -11 (саме такі значення точності забезпечує мережа тактової синхронізації – TMC), то операції вирівнювання відбуватимуться значно рідше – приблизно один раз за 2 доби для указівника TU-12 один раз за 2 години для указівника AU-4.

Висновки

Порівнюючи системи мультимплексування, що використовують синхронний спосіб передавання з синхронною (СЦІ) та асинхронною (ПЦІ) структурами циклу, можна констатувати наступне:

В синхронній структурі групового сигналу (СЦІ) передається інформація про синхронізацію та можливий безпосередній доступ до окремих компонентних потоків (VC/TU). Біти різних компонентних потоків розміщені в циклі групового сигналу на відомих позиціях, фіксованих або закодованих у слові указівника. Синхронна структура передбачає певне фазове співвідношення між циклом групового ЦП та циклами компонентних ЦП. Це співвідношення може або бути постійним, або регулюватися указівником, який відстежує зсув фази компонентних ЦП.

Асинхронна структура циклу групового сигналу (ПЦІ) не дозволяє встановити фазове співвідношення між циклом групового ЦП та циклами компонентних ЦП нижчого порядку. Тому, наприклад, щоб виділити сигнал E12

(2048 кбіт/с) з групового сигналу E4 (139264 кбіт/с), необхідно повністю демультимплексувати сигнал E4 на всі його компонентні потоки. Це та ціна, яку доводиться платити за використання бітового вирівнювання для вирішення задачі мультимплексування асинхронних компонентних ЦП.

Однак якісні показники систем передавання з асинхронною структурою циклу і біт-вирівнюванням (ПЦІ) значно кращі, ніж в системах СЦІ з байт-вирівнюванням. Наприклад, необхідна частота вирівнювання VC-12 за умови точності $\pm 4,6$ ppm становить стрибок фази указівника в первинному ЦП приблизно 3,57 мкс (24 рази за хвилину), а у випадку VC-4 стрибки фази становлять вже 160 нс і відбуваються приблизно 50-60 разів за секунду. Такі значення були неприйнятними з точки зору мережевих вимог, що потребувало впровадження мережі тактової синхронізації. Так, за умов мережевої точності 10–11, відповідні стрибки указівника фази VC-12 відбуваються лише раз за дві доби, а у випадку VC-4 – раз за дві години.

Таким чином, для підтримки необхідних якісних показників ТТМ виникла необхідність впровадження мережевих засобів, згаданих у вступі (у випадку СЦІ це мережа синхронізації ТМС), або переходу на пакетний спосіб передавання – АСП (з обмеженням тривалості неперервного передавання тривалістю можливого проскакування пакету), який вже на початку 2000-х років мав значні переваги над ССП з точки зору мережевої універсальності (доступу, комутації тощо).

Однак, незважаючи на значні переваги пакетного, асинхронного передавання, найвищий рівень якості може бути досягнуто у поєднанні з підходами синхронного способу передавання, що можна спостерігати у практичних застосуваннях, наприклад, використання технології синхронного Ethernet (SyncE) для синхронізації пакетних транспортних мереж, а також створення в пакетній мережі тимчасових, наскрізних з'єднань безперервного передавання. Порівняння переваг показників цих методів, зокрема, у мережевому з'єднанні з кількома ретрансляторами, залишається для подальшого вивчення.

Література

1. Бірюков, М.Л. Транспортні мережі телекомунікацій: Системи мультимплексування: Підручник для студентів вищ. техн. Закладів/ М.Л. Бірюков, В.К. Стеклов, Б.Я. Костік; за ред. В.К. Стеклова. – К.: Техніка, 2005. – 312 с.
2. Bregni, S. Synchronization of Digital Telecommunication Networks/ S. Bregni.- John Wiley & Sons, Ltd, – 2002.- 395 pp.
3. Biriukov, N. Time and synchronization in telecoms./N. Biriukov, N. Triska.-Lecture Notes in Electrical Engineering. Volume 560: Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems. – Springer, 2019.- ISSN 1876-1100. ISBN 978-3-030-16770-7.
4. ITU-T Recommendation G.701 (03/93) Vocabulary of digital transmission and multiplexing, and pulse code modulation (PCM) terms.
5. Бірюков Н.Л. Вероятностный анализ передачи информации в плейзохронной сети. / Н.Л. Бірюков, Н.Р. Триска.- Іфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали четвертої міжнар. наук.-пр. конф., м. Одеса жовт. 2014 р. – Ч.1. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – С. 115-119.

6. Бирюков, Н.Л.. Анализ проскальзывания в плезиохронной сети/ Н.Л.Бирюков ., Н. Р. Трыска // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт.- 2016. - Том 10, №2.. – С. 19-24.
7. Керівний нормативний документ – КНД 45–074–97: Системи передавання цифрові. Норми на параметри основного цифрового каналу і цифрових трактів первинної мережі зв'язку України. Видання офіційне. Державний комітет зв'язку. Київ 1998.
8. Гордиенко, В.Н.. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В.Н. Гордиенко., М.С..Тверецкий.- М.: Горячая линия – Телеком, 2007.– 416 с.

Reference

1. Biryukov, M.L.Transportni merezhi telekomunikatsiy: Systemy mul'typleksuvannya: Pidruchnyk dlya studentiv vyshch. tekhn. Zakladi/ M.L. Biryukov, V.K. Steklov, B.YA. Kostik; za red. V.K. Steklova. – K.: Tekhnika, 2005. – 312 s.
2. Bregni, S. Synchronization of Digital Telecommunication Networks/ S. Bregni.- John Wiley & Sons, Ltd, – 2002.- 395 pp.
3. Biriukov, N. Time and synchronization in telecoms./N. Biriukov, N. Triska..-Lecture Notes in Electrical Engineering. Volume 560: Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems. – Springer, 2019.- ISSN 1876-1100. ISBN 978-3-030-16770-7.
4. ITU-T Recommendation G.701 (03/93) Vocabulary of digital transmission and multiplexing, and pulse code modulation (PCM) terms.
5. Byryukov, N.L. Veroyatnostnyy analiz peredachy ynformatsyy v plezyokhronnoy sety . / N.L. Byryukov, N.R. Tryska.- Ifokomunikatsiyi – suchasnist' ta maybutnye: materialy chetvertoyi mizhnar. nauk.-pr. konf., m. Odesa zhovt. 2014 r. – CH.1. – Odesa: ONAZ, 2014. –S. 115-119.
6. Byryukov, N.L.. Analiz proskal'zyvaniya v plezyokhronnoy sety/ N.L.Byryukov ., N. R. Tryska // T-Comm: Telekommunikatsyy y transport.- 2016. - Том 10, №2.. – С. 19-24.
7. Kerivnyy normatyvnyy dokument – KND 45–074–97: Systemy peredavannya tsyfrovi. Normy na parametry osnovnoho tsyfrovoho kanalu i tsyfrovyykh traktiv pervynnoyi merezhi zv'yazku Ukrayiny. Vydannya ofitsiyne. Derzhavnyy komitet zv'yazku. Kyiv 1998.
8. Hordyenko, V.N.. Mnohokanal'nye telekommunikatsyonnye systemy. Uchebnyk dlya vuzov/ V.N. Hordyenko., M.S..Tveretskyy.- M.: Horyachaya lynyya – Telekom, 2007.– 416 s.