

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Українська державна академія залізничного транспорту

БОЙКО ДЕНИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396

**МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЗА
КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ЙМОВІРНОСТІ ПОМИЛКИ ПЕРЕДАЧІ
ПРИ ОБМЕЖЕННІ НА ПІКОВУ ПОТУЖНІСТЬ І ВПЛИВІ ПРОЦЕСУ
СИНХРОНІЗАЦІЇ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Альошин Геннадій Васильович, Українська державна академія залізничного транспорту, професор кафедри «Транспортний зв'язок».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лосєв Юрій Іванович, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри «Теоретичної та прикладної системотехніки»;

кандидат технічних наук, доцент
Турупалов Віктор Володимирович, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», декан факультету «Комп'ютерні інформаційні технології та автоматика».

Захист відбудеться «___» _____ 2012 року о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.01 в Українській державній академії залізничного транспорту, 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха 7.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту, 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха 7.

Автореферат розісланий «___» _____ 2012 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент

К.А. Трубчанінова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Поява сучасних цифрових систем і мереж зв'язку на базі оптоволоконних ліній значно підвищила якість послуг зв'язку і їх функціональні можливості. Перспектива розвитку цифрових систем та мереж основана на таких основних їх перевагах перед іншими системами зв'язку:

- 1) можливість повної автоматизації систем передачі інформації і мереж та підсистем диспетчеризації, індикації, управління та регулювання режимів систем;
- 2) гнучкість систем передачі щодо видів послуг, поєднання функцій;
- 3) розширення можливостей використання наявних мереж за рахунок ієрархії мультиплексування;
- 4) універсалізація та поєднання різних видів мереж;
- 5) можливість оптимальної маршрутизації сигналів;
- 6) можливість підвищення завадостійкості за рахунок кодування та переваг, пов'язаних з використанням оптоволоконних ліній.

В роботі передбачається, що використовується синхронізація приймального генераторного обладнання з використанням окремого каналу синхронізації. В такому випадку підвищується якість роботи системи синхронізації в порівнянні з системами, які використовують виділення сигналів синхронізації з інформаційних послідовностей. Особливо це важливо для цифрових систем передачі (ЦСП) значної інтеграції і значних дальностях ліній зв'язку.

Відомо багато публікацій, присвячених різним видам, засобам, способам та системам синхронізації для систем зв'язку різних типів. Відомі вчені у цій галузі за всіх часів: Левін В.А., Капланов М.Р., Шахгільдян В.В., Стиффлер Дж., Свириденко С.С., Євтянов С.І., Зюко А.Г., Тихонов В.І., Тузов Г.Н., Гуткін Л.С., Шахтарін Б.І., Капранов Н.В., Мідлтон Д., Пратт В.К., Бакланов Н.Г., Скляр Б., Слепов Н.Н., та інші. Але питанням впливу систем синхронізації на завадостійкість, наділено недостатньо уваги.

Актуальність теми дисертаційних досліджень обумовлюється необхідністю підвищення завадостійкості ЦСП за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі, на яку впливає канал синхронізації, за рахунок врахування наявності обмеження на пікову потужність передавача та впливу джитеру і вандеру.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження дисертаційної роботи виконувалися відповідно до наступних нормативних актів:

- 1) Державна науково-технічна програма «Створення перспективних телекомунікаційних систем і технологій»;
- 2) Концепція створення Державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження), схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 липня 2003р. №410-р;

3) Державна програма "Інформаційні та комунікаційні технології в освіті і науці" на 2006-2010 роки, затверджена постановою КМУ від 7 грудня 2005 р., №1153;

4) Закон України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки» № 537-V від 09 січня 2007 року.

Мета і задача досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення завадостійкості ЦСП за рахунок оптимального розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним та синхронізуючим каналами за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі при обмеженні на пікову потужність передавача із врахуванням дестабілізуючих процесів в каналі синхронізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1) провести системний аналіз впливу каналу синхронізації на завадостійкість ЦСП з обмеженим енергетичним потенціалом;

2) виконати оптимізацію ЦСП за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі при обмеженому енергетичному потенціалі з урахуванням впливу каналу синхронізації і дестабілізуючих процесів в ньому;

3) провести системний аналіз впливу дестабілізуючої амплітудної модуляції сигналу на точність роботи схеми фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) приймального генераторного обладнання ЦСП;

4) провести системний аналіз впливу джитеру і вандеру в каналі синхронізації на завадостійкість ЦСП.

Об'єктом дослідження є процес синхронізації і фазування сигналів приймального генераторного обладнання.

Предметом дослідження є метод оптимізації ЦСП за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі при обмеженому енергетичному потенціалі з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів в каналі синхронізації.

Методи дослідження: методи теорії електричного зв'язку, теорії складних систем, теорії ймовірностей, математичної статистики та математичного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. Результатом дисертаційної роботи є постановка та вирішення задачі підвищення завадостійкості ЦСП шляхом оптимального розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним та синхронізуючим каналами при обмеженні на пікову потужність передавача з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів. При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Отримав подальший розвиток метод розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним і синхронізуючим каналами цифрових систем передачі за критерієм мінімальної ймовірності помилки передачі, який відрізняється від відомих врахуванням впливу обмеження по піковій потужності передавача, джитеру і вандеру.

2. Отримала подальший розвиток математична модель оцінки числових характеристик системи ФАПЧ із затримкою в генераторному обладнанні ЦСП, яка відрізняється від існуючих врахуванням впливу додаткової

амплітудної модуляції вхідного сигналу і завади на джитер сигналу з метою підвищення точності оцінки якості роботи ФАПЧ.

3. Вперше отримані залежності числових характеристик джитеру і вандеру сигналу синхронізації від дисперсії завади, які на відміну від існуючих дозволяють враховувати їх вплив на завадостійкість ЦСП.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає в наступному:

1. Отримані вирази для інженерних розрахунків необхідного енергетичного потенціалу інформаційного та синхронізуючого каналів ЦСП на основі запропонованого методу оптимального узгодження параметрів вказаних каналів за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі.

2. Запропонований пристрій інвертування нулів манчестерського коду, який гарантовано забезпечує збереження 50% енергії сигналу при виділенні гармоніки тактової частоти.

3. Отримані числові характеристики джитеру і вандеру сигналів, нестабільності амплітуди та флукуаційної складової фази сигналу керованого генератора, які дають можливість оцінювати ці дестабілізуючі явища при модернізації існуючих і розробці нових радіорелейних, тропосферних, супутникових, оптичних ЦСП з обмеженням по піковій потужності передавача.

4. На основі методів компенсації впливу джитеру і вандеру гармоніки тактової частоти запропоновані технічні рішення і алгоритм, які дають можливість зменшити вплив дестабілізуючих явищ на завадостійкість ЦСП.

Особистий внесок автора. Основні результати, методи системного аналізу і синтезу цифрових систем, що отримані автором особисто, викладені у п'яти наукових статтях, опублікованих у наукових виданнях, які входять до переліку ВАК України. У наукових статтях, які опубліковані в співавторстві, внесок автора полягає у наступному: [1] – запропонований метод оптимізації завадостійкості цифрової системи передачі інформації за рахунок перерозподілу енергетичного потенціалу між інформаційним і синхронізуючим каналами, розраховано втрати енергетичного потенціалу при використанні манчестерського коду; [2] – виконана оцінка впливу рівнів порогу і завад на числові характеристики джитеру у цифрових системах зв'язку; [3] - виконана оцінка впливу похибки фазової синхронізації на якість ФАПЧ з синхронним детектором та схемою АРП; [4] – запропонований метод оптимального узгодження параметрів інформаційного та синхронізуючого каналів ЦСП за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися і були схвалені на наступних науково-технічних конференціях:

- 22-й міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України», Алушта, 2009р.;

- 5-й міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми та досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», Запоріжжя, 2010 р.;

- 23-й міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України», Алушта, 2010р.;

- науково-практичній конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку», Харків, 2011 р.;

- 19-й міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», Харків: НТУ «ХП», 2011 р.;

- 24-й міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України», Алушта, 2011 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладені в 5 наукових статтях, які опубліковані у наукових виданнях, що входять до переліку ВАК України (3 статті - у наукових журналах, 2 статті - у збірниках наукових праць), та шести тезах-довідей на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатку.

Повний обсяг дисертації складає 143 сторінки, у тому числі 46 рисунків, 1 додаток на 2 сторінках, список використаних літературних джерел містить 123 найменування на 12 сторінках. Дисертація написана російською мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкривається зміст та стан розглянутої науково-технічної проблеми в галузі телекомунікацій, обґрунтовується актуальність теми досліджень, визначається зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, формулюється мета та задача дослідження, визначаються об'єкт, предмет та методи досліджень, формулюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ – «Принципи синхронізації в цифрових телекомунікаційних системах та мережах передачі інформації» - присвячено аналізу основних видів, методів, пристроїв синхронізації та їх параметрів. Розглянуті принципи синхронізації сучасних цифрових телекомунікаційних систем SDH і PDH, види фазових спотворень (джитеру та вандеру) та причини їх виникнення. Приведені існуючі методи оцінки завадостійкості ЦСП.

Синхронізацією прийнято називати процес установалення й підтримки певних часових співвідношень між двома й більше процесами, за рахунок

чого підтримується безперервність переданої інформації й забезпечується її цілісність, тобто визначається положення переданих кодових слів та їхня послідовність.

Розрізняють тактову, групову й циклову види синхронізації. Зрив тактової синхронізації призводить до появи прослизувань (випадіння одного імпульсу (тактового інтервалу), або формування зайвого імпульсу), які призводять до збільшення коефіцієнту помилок при прийомі сигналів у цифрових мережах. Оскільки якість функціонування тактової синхронізації життєво необхідна для сучасних синхронних систем передачі інформації SDH, тому саме цьому виду синхронізації, а також його впливу на завадостійкість ЦСП в цілому, приділена увага в дослідженнях даної роботи.

Огляд основних методів тактової синхронізації сучасних цифрових мереж передачі інформації приводить до наступного висновку. Найперспективнішим методом синхронізації є примусовий (синхронізація «ведучий-ведений»), оскільки даний спосіб побудови мережі синхронізації забезпечує високу стабільність частоти і найбільш простий у реалізації, що і є основними причинами широкого поширення в сучасних цифрових системах передачі, таких як SDH. Основним недоліком сучасних ЦСП є недостатня завадостійкість, що приводить до необхідності застосування спеціальних мір та нових шляхів для її підвищення, чому і присвячена дана робота.

Примусовий метод синхронізації може бути реалізований як на використанні окремого каналу синхронізації, так і без нього (при цьому сигнали синхронізації виділяють з інформаційних сигналів).

Аналіз ефективності обох способів приводить до висновку, що доцільність використання окремого каналу синхронізації зростає при: збільшенні інтеграції ЦСП; зростанні завад або при збільшенні дальності лінії зв'язку; зв'язку з рухомими об'єктами.

Серед сучасних пристроїв синхронізації найпоширенішими є замкнуті пристрої синхронізації (пристрої фазового автопідстроювання частоти) через їх відносну простоту реалізації, проте, при цьому вони не здатні повністю компенсувати дію фазових дрижань (джитер) та дрейфу фази (вандер) тактової частоти, які відбуваються при передачі по каналу зв'язку.

Аналіз існуючих методів оцінки механізму впливу якості функціонування підсистеми синхронізації на завадостійкість ЦСП з окремим каналом синхронізації дозволяє стверджувати, що цьому питанню приділено недостатньо уваги з боку вчених та спеціалістів в галузі синхронізації. Тому основним напрямом досліджень обрано саме цю науково-технічну проблему, оскільки вирішення її дозволить не лише оцінювати вплив каналу синхронізації на завадостійкість, а і розробити методи підвищення завадостійкості ЦСП на основі правильного (оптимального) розподілу енергетичного потенціалу між основним інформаційним та синхронізуючим каналами.

У **другому розділі** – «Метод підвищення завадостійкості цифрових систем передачі інформації» - обґрунтована необхідність врахування впливу якості функціонування підсистеми синхронізації на завадостійкість, як один з

найважливіших показників якості ЦСП, що дозволяє більш точно проводити оцінку ймовірності бітової помилки, а також дозволяє синтезувати оптимальні ЦСП з високою завадостійкістю.

Завадостійкість можна охарактеризувати ймовірністю бітової помилки (BER) у цифровій системі передачі інформації p_{BER} , що залежить не тільки від схеми прийняття рішення про інформаційний символ, але й від схем утримання тактової синхронізації в смузі утримання, від схем циклової і зверхциклової синхронізації. Тобто p_{BER} є суміщенням всіх зазначених подій, обумовлених відповідно ймовірністю правильного прийняття рішення про інформаційний символ $(1 - p_{i\hat{i}})$, довірчими ймовірностями допустимої якості роботи ЦСП за рахунок утримання тактової $(1 - p_{\tau})$, циклової $(1 - p_{\hat{o}\bar{n}})$ і зверхциклової $(1 - p_{\hat{c}\bar{o}\bar{n}})$ синхронізацій в заданій смузі:

$$p_{BER} = 1 - (1 - p_{i\hat{i}})(1 - p_{\tau})(1 - p_{\hat{o}\bar{n}})(1 - p_{\hat{c}\bar{o}\bar{n}}). \quad (1)$$

Ймовірність помилки прийому символу у схемі прийняття рішень $p_{i\hat{i}}$ відома й повинна відповідати критерію ідеального спостерігача.

Довірчу ймовірність допустимої якості роботи ЦСП за рахунок утримання тактової синхронізації систем SDH можна оцінити наступним чином:

$$\hat{p}_{i\hat{i}} = \int_{-\sigma_{\hat{o}\bar{o}}}^{\sigma_{\hat{o}\bar{o}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \hat{p}_{i\hat{i}} \left(-\frac{\Delta\tau^2}{2\sigma_j^2} \right) d(\Delta\tau), \quad (2)$$

де σ_j^2 - дисперсія фазового джитеру тактової частоти; $\Delta\tau$ - випадковий зсув фази, $\sigma_{\hat{o}\bar{o}} = (0,15 \div 0,2) \cdot t_i$ - смуга утримання ФАПЧ; t_i - тривалість імпульсу.

Для ІКМ-систем при відношенні сигнал/шум $q=256$ величина ймовірності погіршення якості роботи ЦСП за рахунок неутримання тактової синхронізації в заданій смузі становить близько 10^{-7} . Необхідна ймовірність помилки одного біта інформації повинна бути не гірше 10^{-9} для ЦСП. Це значить, що ймовірність погіршення якості роботи ЦСП за рахунок неутримання тактової синхронізації в заданій смузі майже на 2 порядки більше, ніж власне необхідна ймовірність помилкового рішення про інформаційний символ, навіть без огляду на вплив циклової й зверхциклової синхронізації. Таким чином, врахування впливу якості функціонування підсистем синхронізації на завадостійкість ЦСП є важливою науково-технічною проблемою, звідки випливає актуальність теми дисертаційної роботи.

Ймовірність помилки прийому відеоімпульсу для дискретного симетричного каналу без пам'яті з врахуванням впливу дестабілізуючих явищ (джитеру, вандеру, дестабілізуючої модуляції сигналу) можна визначити за допомогою виразу:

$$p_{i\hat{i}} = Q\left(\frac{\sqrt{\mu q_2}}{2}\right), \quad (3)$$

де q_2 - відношення сигнал/шум на виході інформаційного каналу; μ - параметр впливу дестабілізуючих явищ; $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - F(x)$ -

додаткова функція помилок; $F(x)$ - інтеграл імовірності (Лапласа-Гауса).

Ймовірність погіршення якості роботи ЦСП за рахунок неутримання тактової синхронізації в заданій смузі з використанням двоканального фазового дискримінатора визначається за допомогою наступного виразу:

$$p_{\tau} = Q\left(\frac{\alpha_{\omega\delta} t_s}{\sigma_j}\right) = Q(6\alpha_{\omega\delta} \sqrt{q_1}) = Q(\xi \sqrt{q_1}), \quad (4)$$

де q_1 - відношення сигнал/шум на виході синхронізуючого каналу; $\xi = 6\alpha_{\omega\delta}$ - параметр каналу синхронізації; $\alpha_{\omega\delta} < 0,2$ - відносна смуга утримання.

Підставляючи (3) і (4) у (1), ми визначаємо ймовірність помилки передачі інформації p_{BER} з врахуванням впливу каналу тактової синхронізації, тобто цільову функцію даної науково-технічної задачі:

$$p_{\text{BER}} = 1 - \left(1 - 2Q\left(\frac{\sqrt{\mu q_2}}{2}\right)\right) \left(1 - 2Q(\xi \sqrt{q_1})\right). \quad (5)$$

Сучасні радіорелейні, тропосферні, супутникові, оптоволоконні ЦСП, особливо ті, які використовують передачу синхросигналів по тому ж самому каналу, що й інформаційні сигнали, мають обмеження на максимальну потужність передавача.

Тому в дисертаційній роботі було розглянуто вплив обмеження по піковій потужності передавача P_n на цільову функцію (5), тобто:

$$P_1 + P_2 \leq P_n, \quad (6)$$

де P_1 й P_2 - потужності синхронізуючого й інформаційного каналів відповідно.

У реальному випадку, коли смуги каналів або час спостереження сигналів T у каналах однакові, рівність (6) можна замінити рівністю (7), якщо поділити ліву й праву частину на спектральну потужність завади N_0 на виході кожного з каналів:

$$\frac{P_1 \Delta}{N_0} + \frac{P_2 \Delta}{N_0} \leq \frac{P_n \Delta}{N_0};$$

$$q_1 + q_2 \leq q, \quad (7)$$

де $q = \frac{PT}{N_0}$ - загальний енергетичний потенціал.

Для загального випадку, коли смуги пропускання каналів різні, формула (7) буде виглядати наступним чином:

$$\mu_1 \frac{P_1}{N_0 \Pi_1} + \mu_2 \frac{P_2}{N_0 \Pi_2} = \frac{P}{N_0 \Pi_{\text{прч}}}, \quad (8)$$

де $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_{\dot{I}D \times}$ - відповідно смуги пропускання каналу синхронізації, інформаційного каналу і загального каналу, який в радіотехнічних системах може бути каналом підсилення радіочастоти (ПРЧ), $\mu_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_{\dot{I}D \times}}, \mu_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_{\dot{I}D \times}}$.

Тоді співвідношення (8) можна представити у вигляді:

$$\mu_p q_1 + q_2 = \frac{q_{\dot{I}D \times}}{\mu_2} = q_{\dot{a}}, \quad \text{або} \quad q_{e1} + q_2 = q_e, \quad (9)$$

де $\mu_p = \frac{\mu_1}{\mu_2}, q_{e1} = \mu_p q_1, q_e = \frac{q_{\text{ПРЧ}}}{\mu_2}$.

Тому задачу можна формально вирішувати в позначеннях (7), а потім для різних смуг пропускання каналів після обробки сигналів і різних випадків реалізації системи перейти до позначень формули (9). Вплив на потужність вхідних сигналів можна врахувати, крім того, множителем μ_p .

Науково-технічна задача ставиться наступним чином: необхідно знайти оптимальний розподіл енергетичного потенціалу між інформаційним і синхронізуючим каналами за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі при обмеженні по піковій потужності передавача. Математично дану задачу можна записати так:

$$\left\{ \min p_{\text{BER}} = Q\left(\frac{\sqrt{\mu q_{\dot{a}} y_2}}{2}\right) + Q\left(\xi \sqrt{q_{\dot{a}}(1-y_2)}\right) - 2Q\left(\frac{\sqrt{\mu q_{\dot{a}} y_2}}{2}\right) Q\left(\xi \sqrt{q_{\dot{a}}(1-y_2)}\right); \quad (10)$$

при $q_1 + q_2 \leq q_{\dot{a}}$;

де $y_2 = \frac{q_2}{q_{\dot{a}}}$; $q_1 = (1-y_2)q_{\dot{a}}$; $q_2 = y_2 \cdot q_{\dot{a}}$.

Рішення поставленої науково-технічної задачі, тобто оптимальне значення (мінімум) функції (10) при обмеженні (7) та без врахування впливу дестабілізуючих явищ (при $\mu = 1$) виглядає так:

$$y_{2\text{опт}} = \frac{4\xi^2}{1+4\xi^2} - \frac{16 \ln \xi}{(1+4\xi^2)q_e}. \quad (11)$$

Слід зазначити, що з ростом відношення сигнал/шум згідно (10) зростає завадостійкість ЦСП, але за умови точного дотримання оптимального розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним та синхронізуючим каналами (11). Незначне відхилення (на 5%) від оптимального розподілу енергії між вказаними каналами приводить до падіння завадостійкості ЦСП приблизно на 3-4 порядки при значних відношеннях сигнал/шум ($q_e = 500$).

На основі формул (10-11) розроблено метод оптимального узгодження параметрів інформаційного та синхронізуючого каналів ЦСП за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі, який дозволяє отримати вигравш у завадостійкості (для ІКМ-систем вигравш сягає не менше ніж 2 порядки).

Звідси впливає 2 можливі методи: 1) метод забезпечення необхідної завадостійкості ($p_{\text{BER}} = 10^{-9}$) за рахунок збільшення відношення сигнал/завада, розраховуючи на допустиме зменшення величини μ при оптимальному

розподілі енергетичного потенціалу між інформаційним та синхронізуючим каналами (компромісний метод); 2) метод боротьби з дестабілізуючими явищами, спрямований на збільшення величини μ аж до 1 (класичний метод). Очевидно, що системи, побудовані на основі першого методу будуть надлишковими, тому подальші дослідження присвячені розвитку другого методу.

Також було доведено і обґрунтовано доцільність вибору манчестерського коду з використанням розробленого пристрою інвертування імпульсів нулів. При збереженні переваг у завадозахищеності манчестерські коди забезпечують стабільність амплітуди гармоніки тактової частоти, що виділяється, збільшується точність пристрою виділення тактової частоти (ВТЧ), а також зменшується вплив джитеру, обумовленого завадами. Використання оптимального методу і засобу кодування сигналу за критерієм максимуму енергетичного потенціалу каналу синхронізації дозволяє гарантовано зберегти 50 % енергії сигналу тактової частоти, що не може забезпечити жодний з інших методів лінійного кодування через можливість роботи у протифазі з пристроєм виділення тактової частоти.

При переході символів інформаційної одиниці в інформаційний нуль при кодуванні манчестерським кодом виникають енергетичні втрати $n_{\dot{a}0 \delta \dot{a}0}$, які можна оцінити за допомогою наступного виразу:

$$n_{\dot{a}0 \delta \dot{a}0} = \sum_{i=1}^4 n_i p_i, \quad (12)$$

де n_i - кількість переходів інформаційної «1» в інформаційний «0» на довжині кодування манчестерським кодом $n_{i \dot{a}i}$, p_i - імовірність появи відповідного n_i .

З урахуванням втрат (12), можна визначити енергетичний спектр сигналу:

$$G(f) = \left(U_m \cdot \frac{(n_{i \dot{a}i} - n_{\dot{a}0 \delta \dot{a}0})}{n_{i \dot{a}i}} \right)^2 T \left(\frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \right)^2 = 0,5373 \cdot U_m^2 T \left(\frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \right)^2, \quad (13)$$

де U_m і T - відповідно амплітуда та період імпульсів.

Енергія $n_{i \dot{a}i}$ тактових імпульсів визначається таким чином:

$$\dot{A}_0 = \dot{A}_0 \cdot (n_{i \dot{a}i} - n_{\dot{a}0 \delta \dot{a}0}) = \dot{E}_0 \cdot t_s \cdot (n_{i \dot{a}i} - n_{\dot{a}0 \delta \dot{a}0}), \quad (14)$$

де \dot{A}_0 - енергія тактового імпульсу; \dot{E}_0 - потужність тактового імпульсу;

Отже, енергетичний потенціал \dot{A}_0 у фільтрових схемах ВТЧ для манчестерських кодів приблизно оцінюється співвідношеннями (13), (14), а енергетичний потенціал \dot{A}_{NRZ} для кодів NRZ – наступним співвідношенням:

$$\dot{A}_{NRZ} = \dot{A}_0 n_{iNRZ}, \quad (15)$$

де n_{iNRZ} - число імпульсів, що сприяють коливанню у ВТЧ для кодів NRZ.

Завдяки цьому очевидним стає метод боротьби з кодозалежним джитером, що дозволяє зберегти 50% енергетичного потенціалу за рахунок

використання манчестерських лінійних кодів з розробленим пристроєм інвертування імпульсів нулів.

В другому розділі також проведено системний аналіз впливу дестабілізуючої амплітудної модуляції сигналу на точність роботи схеми ФАПЧ з затримкою, що з синхронним детектором та схемою автоматичного регулювання підсилення (АРП) приймального генераторного обладнання ЦСП.

Доведено, що окрім відомих особливостей синхронний детектор, характеризується тим що: при великих дисперсіях фази генератора, що задає, особливо при входженні в синхронізм, збільшує крутизну характеристики фазового дискримінатора.

Далі відшукуються числові характеристики розподілу джитеру генератора, що задає, які впливають на дестабілізуючу амплітудну модуляцію ФАПЧ з затримкою.

Якщо допустити, що погрішність ФАПЧ невелика, то детекторну характеристику синхронного детектору навколо точної настройки ФАПЧ за фазою можна розкласти у ряд Тейлора з точністю 10%:

$$u(\varphi) = U_m \cos \varphi \approx U_m (1 - \varphi^2 / 2 + \varphi^4 / 4! - \dots) \approx U_m (1 - \varphi^2 / 2) \approx U_m \exp(-\frac{\varphi^2}{2}), \quad (16)$$

де U_m – максимальне значення напруги; φ - різниця фаз прийнятого та опорного сигналів.

Погрішність ФАПЧ при відношенні потужностей сигналу до шуму більше 5 ($q > 5$) має практично нормальний розподіл ймовірності, що обумовлено вузькою смугою утримання та дією декількох рівномірних факторів:

$$p(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} \exp(-\frac{\varphi^2}{2D_x}), \quad (17)$$

де D_x – дисперсія шумової складової похибки ФАПЧ.

У режимі автосупроводу сигналу за фазою в межах максимуму апроксимацією характеристики синхронного детектору може бути закон:

$$G = \frac{u(\varphi)}{U} = \exp(-\frac{\varphi^2}{2}). \quad (18)$$

Щільність розподілу ймовірності відносного рівня сигналу (дестабілізуючої амплітудної модуляції сигналу) можна визначити так:

$$p(G) = \sqrt{\alpha_x / \pi} \frac{G^{\alpha_x - 1}}{\sqrt{\ln \frac{1}{G}}}, \quad (19)$$

де $\alpha_x = \frac{1}{D_x}$.

Математичне очікування та n -й початковий момент дестабілізуючої модуляції відносного рівня сигналу визначаються наступним чином:

$$M[G] = \sqrt{\frac{\alpha_x}{\alpha_x + 1}}; \quad M[G^n] = \sqrt{\frac{\alpha_x}{\alpha_x + n}}. \quad (20)$$

Принцип синхронного детектування зменшує середній рівень шуму у $\sqrt{2}$ рази. Але для цього потрібне синхронне детектування з його нестабільністю фази, що вже зменшує рівень сигналу на виході фазового детектору згідно виразам (20) та рис. 1.

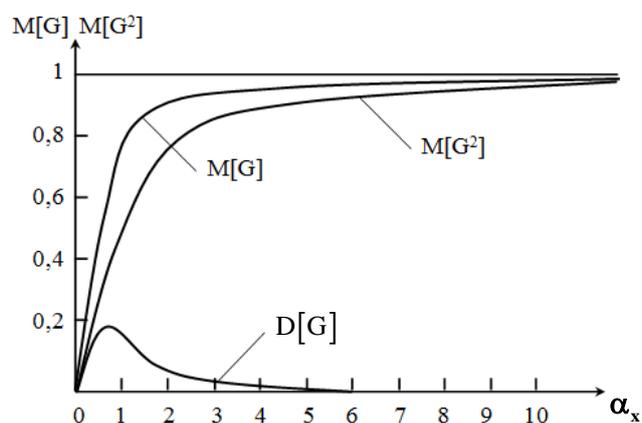


Рис. 1. Числові характеристики дестабілізуючої амплітудної модуляції вхідного сигналу

Врахування зменшення відносної амплітуди за рахунок фазової похибки доцільне вже при $\alpha_x \leq 8$, а при $\alpha_x \approx 1$ воно просто необхідне, оскільки при $\alpha_x = 8$ середні енергетичні втрати складають 10%, а при $\alpha_x = 1$ - 50%. Очевидно, що із зменшенням α_x зростає роль мультиплікативної завади АРП за рахунок флуктуацій фази ФАПЧ, що має розподіл (19), обумовлений формами розподілу флуктуацій фази і характеристики синхронного детектору.

У **третьому розділі** – «Аналіз впливу фазового дрижання і дрейфу фази на завадостійкість цифрових систем зв'язку» вперше проведений системний аналіз впливу джитеру та вандеру на числові характеристики каналу синхронізації з метою визначення їх впливу на інформаційний канал.

Форма переднього й заднього фронтів вихідного імпульсу напруги $U_c(t)$ із врахуванням завади відповідає залежностям:

$$U_n(t) = U_m [1 - \exp(-t_i/T_\phi) \pm \delta_1], \quad U_3 = U_m \exp[(-t_i/T_\phi) \pm \delta_2], \quad (21)$$

де $\dot{\delta}_\phi$ - постійна часу фільтра; U_m - амплітуда імпульсу; δ_1, δ_2 - відповідно відношення рівня завади до рівня сигналу в моменти часу t_1, t_2 , що відповідають затримці при реєстрації відповідно переднього та заднього фронтів сигналу.

Залежність зміни тривалості Δt_3 вихідного імпульсу напруги від його рівня $\alpha = U_c(t)/U_m$ визначається як:

$$\Delta t_3 = T_\delta \cdot \ln \frac{1-\alpha}{\alpha}. \quad (22)$$

Звідси виходить, що вимірювати запізнювання найкраще на рівні 1/2, оскільки вплив завад менше, і тому, що тривалість вихідного імпульсу дорівнює тривалості вхідного імпульсу, що допоможе використати й задній фронт вихідного імпульсу.

Якщо завада мало змінюється за час дії імпульсу, то відносну тривалість імпульсу (джитер) на рівні α можна визначити так:

$$\eta = \frac{\Delta t_3}{T} = \ln \frac{1-\alpha \pm \delta}{\alpha \pm \delta}. \quad (23)$$

Щільність розподілу ймовірності відносної тривалості вихідного імпульсу η , яка очевидно має майже гаусів характер, визначаємо наступним чином:

$$p(\eta) = \frac{e^{\frac{\eta}{\sigma}}}{4\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{\left(e^{\frac{\eta}{\sigma}} - 1\right)^2}{8\sigma^2}\right], \quad (24)$$

де σ - дисперсія завади.

Математичне очікування $M[\eta]$ й дисперсію відносної тривалості вихідного імпульсу $D[\eta]$ можна визначити з наступних виразів:

$$M[\eta] = \int_0^1 \eta p(\eta) d\eta = \bar{\eta}; \quad D[\eta] = \int_0^1 [\eta - \bar{\eta}]^2 p(\eta) d\eta. \quad (25)$$

Відношення сигнал/завада змінюється за рахунок впливу джитеру, що можна врахувати за допомогою виразу:

$$q_{2\eta} = \frac{\bar{\eta} \cdot U_m^2}{N_0 \cdot \dot{I}} = \frac{\mu_\eta \cdot U_m^2}{N_0 \cdot \dot{I}} = \mu_\eta \cdot q_2, \quad (26)$$

де $\mu_\eta = \bar{\eta}$ - параметр впливу джитеру.

Таким чином вплив середнього джитеру на завадостійкість можна врахувати наступним чином:

$$\left\{ \min p_{BER} = Q\left(\frac{\sqrt{\mu_\eta q_a y_{2\eta}}}{2}\right) + Q\left(\xi \sqrt{q_a (1 - y_{2\eta})}\right) - 2Q\left(\frac{\sqrt{\mu_\eta q_a y_{2\eta}}}{2}\right) Q\left(\xi \sqrt{q_a (1 - y_{2\eta})}\right); \quad (27)$$

$$\text{при } q_1 + q_2 \leq q_a.$$

Якщо проаналізувати сімейство залежностей, побудованих за виразами (10) та (27) (рис.2), то можна зробити висновок, що в результаті врахування середнього відносного джитеру виявляється значний вплив на завадостійкість (зокрема при $q_a = 500$ відбувається збільшення p_{BER} аж на 12 порядків), що приводить до великої кількості некерованих прослизувань, а також зміщення оптимальних значень розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним та синхронізуючим каналами. Стає очевидним

необхідність компенсації фазових дрижань, наприклад використання ФАПЧ, обладнаних завадостійким фазовим дискримінатором, які здатні підтримувати задану p_{BER} в умовах впливу джитеру.

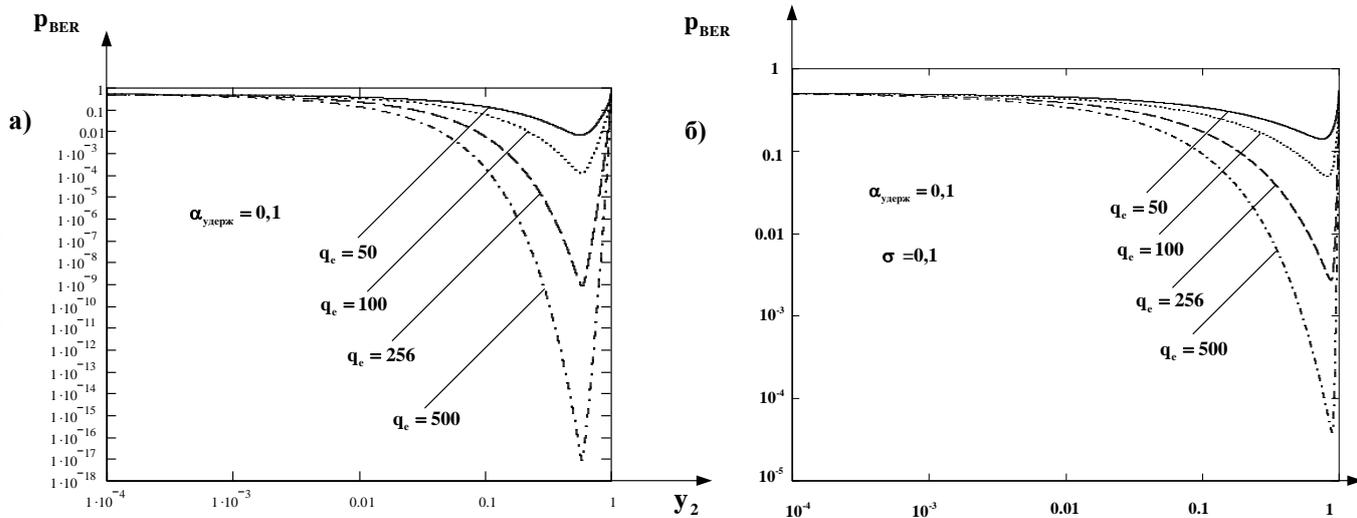


Рис. 2. Залежності: а) p_{BER} від значень y_2 і $q_{\hat{a}}$ при фіксованому значенні $\alpha_{\omega \delta} = 0,1$; б) p_{BER} від значень $y_{2\eta}$ і $q_{\hat{a}}$ при фіксованому значенні $\alpha_{\omega \delta} = 0,1$ та $\sigma = 0,1$

З рис. 2 очевидно, що залежність ймовірності бітової помилки критична до оптимального розподілу енергетичного потенціалу у каналах. Тому необхідне застосування 2 запропонованих методів для підвищення надійності інформаційного каналу.

Вплив вандеру розглядається як зміна періоду і відповідно зміна моментів прийняття рішення про символ у вирішуючому пристрої. При цьому вважаємо, що джерелом вандеру є довгострокова нестабільність генераторів або обмежена смуга пропускання ФАПЧ П.

Вибіг тактової частоти призводить до зсуву моменту прийняття рішення про символ. Якщо один період зсуву моменту рішення рівний Δt_T ,

то за час N періодів зсув накопичується до $\Delta t_{\hat{A}} = \frac{1}{\dot{I}} = N\Delta t_T$.

Якщо вважати, що інформаційний канал якісний і відносний рівень імпульсу у заданий момент часу $\alpha = \frac{U(t+t_s/2)}{U_m}$ на вході вирішуючого пристрою рівний:

$$\alpha(t+t_s/2+\Delta t_{\hat{A}}) = 1 - \exp[-\dot{I}(t+t_s/2+\Delta t_{\hat{A}})], \quad (28)$$

то зсув моменту прийняття рішення про символ можна визначити так:

$$\Delta t_{\hat{A}} = \frac{1}{\dot{I}} \ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right) - t - t_s/2 = \frac{1}{\dot{I}} \left[\ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right) - b \right], \quad (29)$$

де $b = \dot{I}(t+t_s/2)$.

Для вузької смуги каналу ФАПЧ природно вважати, що зсув за рахунок вандеру моментів прийняття рішення про символ відповідає нормальному закону щільності розподілу ймовірності:

$$p(\Delta t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta t_{\hat{A}}^2}{2\sigma^2}\right). \quad (30)$$

Визначимо щільність розподілу ймовірності відносного рівня імпульсу, використовуючи якобіан перетворення, за формулою:

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} \exp\left[-\frac{1}{2\beta^2} \left(\ln \frac{1}{1-\alpha} - b - \beta^2\right)^2 + \frac{1}{2}\beta^2 + b\right], \quad (31)$$

$$\text{де } \beta = \frac{\sigma}{t_s} = \sigma \dot{I}, \quad \gamma = \beta\sigma, \quad \gamma \dot{I} = \frac{\gamma}{t_s} = \frac{\sigma}{t_s} = \beta^2.$$

Числові характеристики визначаємо наступним чином:

$$\bar{\alpha}(\beta) \cong \int_0^{0.9} \alpha p(\alpha) d\alpha; \quad \sigma_{\alpha}^2(\beta) = \int_0^{0.9} (\alpha - \bar{\alpha})^2 p(\alpha) d\alpha. \quad (32)$$

За рахунок впливу вандеру відношення сигнал/завада змінюється, що можна врахувати за допомогою виразу:

$$q_{2\alpha} = \frac{\bar{\alpha} \cdot U_m^2}{N_0 \cdot \dot{I}} = \frac{\mu_{\alpha} \cdot U_m^2}{N_0 \cdot \dot{I}} = \mu_{\alpha} \cdot q_2, \quad (33)$$

де $\mu_{\alpha} = \bar{\alpha}$ - параметр впливу вандеру.

Таким чином вплив середнього джитеру на завадостійкість можна врахувати наступним чином:

$$\left\{ \min p_{BER} = Q\left(\frac{\sqrt{\mu_{\alpha} q_{\hat{a}} y_{2\alpha}}}{2}\right) + Q(\xi \sqrt{q_{\hat{a}}(1-y_{2\alpha})}) - 2Q\left(\frac{\sqrt{\mu_{\alpha} q_{\hat{a}} y_{2\alpha}}}{2}\right) Q(\xi \sqrt{q_{\hat{a}}(1-y_{2\alpha})}); \quad (34)$$

$$\text{при } q_1 + q_2 \leq q_{\hat{a}}.$$

Аналіз виразу (34) дозволяє зробити висновки, що збільшення відносного вандеру призводить до збільшення ймовірності помилки передачі інформації p_{BER} , а також до зсуву мінімуму розподілу енергії між синхронізуючим та інформаційним каналами на користь виділення більшої енергії інформаційному каналу.

Оскільки вандер є випадковою величиною з певною відносною дисперсією (32), то у лінійному наближенні при малій σ_{α}^2 це можна врахувати за допомогою формули:

$$p_{BER} = Q\left(\frac{\sqrt{q_{\hat{a}} y_{2\alpha} (1-\sigma_{\alpha})}}{2}\right) + Q(\xi \sqrt{q_{\hat{a}} (1-y_{2\alpha} (1-\sigma_{\alpha})))} - 2Q\left(\frac{\sqrt{q_{\hat{a}} y_{2\alpha} (1-\sigma_{\alpha})}}{2}\right) Q(\xi \sqrt{q_{\hat{a}} (1-y_{2\alpha} (1-\sigma_{\alpha})))}. \quad (35)$$

Врахування випадкового вандеру зміщує мінімум оптимального розподілу енергії між інформаційним та синхронізуючим каналами, вимагаючи виділення практично всієї енергії інформаційному каналу. При

цьому для великих відношень сигнал/завада (вище 256) відбувається зменшення завадостійкості на два і більше порядків.

В четвертому розділі під назвою «Методи та засоби підвищення точності системи синхронізації, що послабляють вплив джитеру та виявляють вандер в каналі синхронізації» розроблені методи і засоби удосконалення підсистем синхронізації за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі: 1) запропоновані методи та засоби компенсації джитеру, що обумовлений завадою; 2) запропонований метод та засіб для цифрового дискримінатора ФАПЧ, що компенсує вплив завади; 3) використаний критерій Аббе для виявлення та вимірювання систематичної похибки через вплив вандеру з індикацією параметрів, що дозволяють контролювати якість функціонування ЦСП.

Розроблені методи послаблення і компенсації впливу джитеру та контролю вандеру можна застосовувати для зменшення впливу адитивної корельованої завади на джитер гармоніки тактової частоти.

Час кореляції обвідної фільтрованої разом з сигналом завади обернено пропорційний смузі пропускання високочастотного контуру. Це дає можливість для додаткового послаблення впливу завад на джитер фази тактової частоти.

Зміщення гармоніки тактової частоти на величину вузькосмугової завади, що мало змінюється за декілька періодів тактової частоти, призводить до негативного джитеру переднього фронту позитивного напівперіоду сигналу і позитивному джитеру його заднього фронту.

Оскільки завада впродовж періоду міняється мало, то відповідно змінюється джитер обох фронтів напівперіоду сигналу.

Можливі два методи боротьби з джитером, що обумовлений завадою: компенсація завади і відлік значущих моментів на рівні завади.

Перший метод передбачає використання нелінійного методу боротьби з завадою за типом блокування. Це фізичний принцип подавлення слабкого коливання сильним коливанням в нелінійному елементі. Спочатку суміш сильного сигналу з шумом значно посилюється. Потім ця суміш зазнає граничне двостороннє обмеження по амплітуді. Отриманий меандр з шумом на фронтах напівперіодів, або в тактових точках, значно подавлює енергію завади і істотно змінює її спектр. При цьому подавлюється більшою мірою низькочастотна енергія шумів. Подавлюється і сигнал. Спектр його розширюється. Подальша вузькосмугова фільтрація виділяє першу гармоніку тактової частоти і пригнічує її інші гармоніки. Зате спектр завади, що переривається з подвійною тактовою частотою, розширюється. І гармоніка тактової частоти завади зменшується.

Повторна у ВТЧ вузькосмугова фільтрація тактової гармоніки з меандру з ослабленою завадою, що змінилася за спектром, послаблює її додатково за рахунок фільтрування її високочастотних складових. Саме друга фільтрація зменшує і послаблює рівні завади в околиці тактових моментів часу.

Схема подавлення шумів подібним методом відома як схема ШОВ (підсилювач з широкосмуговим фільтром - обмежувач - вузькосмуговий фільтр). Проте пропонується і доцільніше використати схему ВОВ (підсилювач з вузькосмуговим фільтром - обмежувач - вузькосмуговий фільтр). Це істотна пропозиція, оскільки спектр завади слід принципово міняти вже при першій фільтрації перед обмежувачем. Саме це не лише знижує рівень завади, але і знижує рівень завади в околиці тактових моментів часу і відповідно джитер гармоніки тактової частоти.

Запропоновано метод боротьби з джитером, що заснований на використанні завадостійкого детектування при використанні розробленого пристрою завадостійкого фазового дискримінатора. Цей метод дозволяє використати незмінність у часі точок максимуму напруги гармоніки тактової частоти при будь-якому впливі фільтрованої корельованої завади.

Також розроблено метод контролю вандеру на основі застосування критерію Аббе, який дозволяє виявити та виміряти систематичну погрішність фази, обумовлену відходом тактової частоти генераторного обладнання приймача відносно тактової частоти передавача.

Сутність критерію Аббе полягає в порівнянні суми квадратів погрішностей вимірювань з сумою квадратів їх послідовних різниць, які менш чутливі до систематичного зсуву математичного сподівання. При цьому проводиться перевірка гіпотези про відсутність систематичного зсуву (в нашому випадку - вандеру). Якщо розрахований критерій Аббе перевищує певний квантиль при обраному відсотку рівня значимості згідно відомих таблиць, то гіпотеза про систематичний зсув спростовується, тобто вандер має місце. В іншому випадку – вандер відсутній і гіпотеза підтверджується.

Відповідні статистики σ_j^2 та $\sigma_{j\omega}^2$ і власне сам критерій Аббе K_A можна визначити за допомогою наступних виразів:

$$\begin{aligned}\sigma_j^2 &= \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (t_{i+1} - t_i)^2 ; \\ \sigma_{j\omega}^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (t_i - \bar{t}_i)^2 ; \\ K_A &= \frac{\sigma_{j\omega}^2}{\sigma_j^2},\end{aligned}\tag{36}$$

де t_i, \bar{t}_i - відповідно значення періоду і середнього періоду гармоніки тактової частоти.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі на основі теоретичних досліджень вирішена важлива наукова задача, яка полягає в підвищенні завадостійкості ЦСП за рахунок оптимального розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним і синхронізуючим каналами за критерієм мінімуму

ймовірності помилки передачі при обмеженні по піковій потужності передавача.

1. При проведенні дисертаційних досліджень отримані наступні наукові результати:

- обґрунтована необхідність врахування впливу якості функціонування системи синхронізації на завадостійкість ЦСП; отримав подальший розвиток метод оптимального розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним і синхронізуючим каналами, що дозволило поставити і вирішити задачу оптимізації ЦСП за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі при обмеженні на пікову потужність передавача з урахуванням впливу каналу синхронізації і дестабілізуючих процесів; рішення задачі дозволяє підвищити завадостійкість ЦСП не менше ніж на 1-2 порядки в порівнянні з існуючими системами; запропоновано компенсаційний і класичний методи стабілізації завадостійкості ЦСП при відхиленні від оптимального розподілу енергетичного потенціалу в інформаційному та синхронізуючому каналах;

- була обґрунтована доцільність вибору манчестерського коду, який дозволяє використовувати 50% енергії сигналу тактової частоти в порівнянні з приблизно 1% енергії для інших типів лінійного кодування;

- в результаті дослідження ефективності схеми ФАПЧ з затримкою отримані співвідношення для оцінки впливу погрішності ФАПЧ на числові характеристики амплітудної модуляції сигналу на вході фазового детектора, з метою зменшення якої застосовується синхронний детектор;

- проведено дослідження впливу числових характеристик завади, рівня порогу і сигналу на числові характеристики джитеру гармоніки тактової частоти, використання результатів яких дозволяє стабілізувати завадостійкість ЦСП при відхиленні від оптимального розподілу відношення сигнал/шум між інформаційним та синхронізуючим каналами;

- проведено системний аналіз впливу джитеру і вандеру гармоніки тактової частоти в каналі синхронізації на завадостійкість ЦСП, що дозволило обґрунтувати необхідність розробки методів компенсації впливу даних дестабілізуючих факторів; при цьому запропоновані методи і засоби усунення впливу порогового джитеру, джитеру, що обумовлений дією завади на переданий сигнал, а також нестабільності генератора, що задає.

2. У ході виконання дисертаційної роботи були отримані наступні практичні результати:

- отримані вирази для інженерних розрахунків необхідного енергетичного потенціалу інформаційного та синхронізуючого каналів ЦСП на основі запропонованого методу оптимального узгодження параметрів вказаних каналів за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі;

- запропонований пристрій інвертування нулів манчестерського коду, яка гарантовано забезпечує збереження 50% енергії сигналу при виділенні гармоніки тактової частоти;

- отримані числові характеристики джитеру і вандеру сигналів, нестабільності амплітуди та флуктуаційної складової фази сигналу керуваного генератора, які дають можливість оцінювати ці дестабілізуючі

явища при модернізації існуючих і розробці нових радіорелейних, тропосферних, супутникових, оптичних, лазерних систем SDH з обмеженням по піковій потужності передавача;

- на основі методів компенсації впливу джитеру і вандеру гармоніки тактової частоти запропоновані технічні рішення і алгоритм, які дають можливість зменшити вплив дестабілізуючих явищ на завадостійкість ЦСП.

3. Обґрунтування отриманих результатів засноване на коректному застосуванні основних положень теорії електричного зв'язку, теорії складних систем, теорії ймовірностей, математичної статистики та математичного аналізу.

4. Достовірність отриманих результатів підтверджується збіжністю теоретичних та експериментальних результатів, які були отримані за допомогою математичного моделювання.

5. Наукові й практичні результати дисертаційної роботи доцільно використовувати:

- при проведенні науково-дослідних робіт з розробки методів і засобів підвищення завадостійкості ЦСП і точності підсистем синхронізації;

- при проведенні інженерно-конструкторських робіт з модернізації існуючих чи зі створення нових ЦСП, орієнтованих на підвищення завадостійкості;

- при вивченні навчальних дисциплін по теорії систем передачі цифрової інформації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Алешин Г.В. Оптимизация энергетического потенциала цифровых систем с учетом влияния синхронизирующего канала [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: УкрДАЗТ, 2010 р. – Випуск № 1. – С. 60-66.

2. Алешин Г.В. Влияние уровней порога и помех на параметры джиттера в цифровых системах [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Зб. наук. праць. – Х.: УкрДАЗТ, 2010 р. – Випуск № 116. – С. 5-10.

3. Алешин Г.В. Метод оптимального согласования параметров информационного и синхронизирующего каналов цифровых систем передачи по условному критерию минимальной ошибки передачи [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2011 р. – Випуск № 16. - С. 3-9.

4. Альошин Г.В. Вплив похибки фазової синхронізації на якість ФАПЧ з синхронним детектором та схемою АРП [Текст] / Г.В. Альошин, Д.О. Бойко // Наука і техніка Повітряних Сил ЗСУкр. – Х: ХУПС, 2011 р. – Випуск №2(6). – С. 91-93.

5. Бойко Д.О. Вплив вандеру на завадостійкість системи передачі інформації [Текст] / Д.О. Бойко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: УкрДАЗТ, 2012 р. – Випуск № 1. – С. 12-15.
6. Алешин Г.В. Методы повышения эффективности подсистемы синхронизации в ЦСП [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Матеріали двадцять другої міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта, 2009 р. – С. 42-43.
7. Алешин Г.В. Метод повышения помехоустойчивости цифровых систем передачи с разделенными информационным и синхронизирующим каналами на железнодорожном транспорте [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми та досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010 р. – С. 81.
8. Алешин Г.В. Метод оптимизации распределения энергетического потенциала между разделенными информационным и синхронизирующим каналами [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Матеріали двадцять третьої міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта, 2010 р. – С 28-29.
9. Алешин Г.В. Оценка влияния уровней порога и помех на статистические характеристики джиттера в цифровых системах передачи [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Матеріали двадцять четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта, 2011 р. – С. 130-131.
10. Альошин Г.В. Оцінка впливу похибки фазової синхронізації на якість ФАПЧ [Текст] / Г.В. Альошин, Д.О. Бойко // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку». – Х.: Академія внутрішніх військ МВС України, 2011 р. – С. 25-27.
11. Алешин Г.В. Влияние качества синхронизации на помехоустойчивость радиорелейных систем SDH [Текст] / Г.В. Алешин, Д.А. Бойко // Збірник тез доповідей дев'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Х.: НТУ «ХП», 2011 р. – С. 90.

АНОТАЦІЯ

Бойко Д.О. Метод оптимізації цифрових систем передачі за критерієм мінімуму ймовірності помилки передачі при обмеженні на пікову потужність і впливі процесу синхронізації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2012.

Дисертація присвячена розробці та дослідженню методу підвищення завадостійкості цифрових систем зв'язку при обмеженому енергетичному потенціалі за рахунок його оптимального розподілу між роздільними інформаційним та синхронізуючим каналами з урахуванням дестабілізуючих процесів в каналі синхронізації. Розроблені методи та технічні рішення дозволяють врахувати вплив якості функціонування підсистем тактової синхронізації на завадостійкість цифрових систем зв'язку, підвищити точність пристроїв синхронізації. Показано, що застосування оптимального розподілу енергетичного потенціалу між інформаційним та синхронізуючим каналами дозволяє підвищити завадостійкість цифрових систем зв'язку.

Ключові слова: цифрова система зв'язку, синхронізація, оптимізація, завадостійкість, енергетичний потенціал, фазове автопідстроювання частоти, джитер, вандер.

АННОТАЦІЯ

Бойко Д.А. Метод оптимізації цифрових систем передачі по критерію мінімуму вероятності помилки передачі при обмеженні на пикову потужність і вплив процесу синхронізації. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 - Телекоммуникационные системы и сети. - Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2012.

Диссертация посвящена разработке и исследованию методов повышения помехоустойчивости цифровых систем связи при ограниченном энергетическом потенциале за счет его оптимального распределения между отдельными информационным и синхронизирующим каналами с учетом дестабилизирующих процессов.

Необходимым условием функционирования современных цифровых систем и сетей передачи данных является наличие качественной, надежной системы синхронизации. Однако при этом влияние системы синхронизации на помехоустойчивость цифровых систем передачи (ЦСП) в современной литературе исследовано в недостаточной степени.

В работе обоснована необходимость учета влияния качества функционирования подсистемы синхронизации на помехоустойчивость ЦСП, что позволило поставить и решить задачу оптимального распределения энергетического потенциала между информационным и синхронизирующим каналами по критерию минимума вероятности ошибки передачи при ограничении по пиковой мощности передатчика. На основе этого подхода был разработан метод оптимального согласования параметров информационного и синхронизирующего каналов ЦСП, позволяющий

повысить помехоустойчивость не менее чем на 2 порядка по сравнению с существующими системами.

Также была доказана и обоснована целесообразность выбора манчестерского кода с использованием разработанного устройства инвертирования импульсов нулей. При сохранении преимуществ в помехозащищенности, манчестерские коды обеспечивают стабильность амплитуды выделяемой гармоники тактовой частоты. При этом увеличивается точность устройства выделения тактовой частоты (ВТЧ), а также уменьшается влияние джиттера, обусловленного помехами. Использование оптимального метода и средства кодирования сигнала по критерию максимума энергетического потенциала канала синхронизации позволяет гарантированно сохранить 50% энергии сигнала тактовой частоты, что не может обеспечить ни один из других методов линейного кодирования из-за невозможности работы в противофазе с ВТЧ.

Получены аналитические зависимости числовых характеристик дестабилизирующей амплитудной модуляции от дисперсии джиттера, на основе чего доказана необходимость повышения внимания к стабилизации амплитуды сигнала на входе фазового детектора одной из лучших систем ФАПЧ с предыдущим УПЧ и с синхронным детектором

В диссертационной работе проведен системный анализ влияния джиттера и вандера в канале синхронизации на помехоустойчивость ЦСП, что позволило обосновать необходимость разработки методов компенсации влияния данных дестабилизирующих явлений. При этом предложены: 1) методы и средства компенсации джиттера, обусловленного помехой; 2) метод и средство для цифрового дискриминатора ФАПЧ, компенсирующие влияние помехи; 3) метод контроля вандера на основе критерия Аббе.

Ключевые слова: цифровая система связи, синхронизация, оптимизация, помехоустойчивость, энергетический потенциал, фазовая автоподстройка частоты, джиттер, вандер.

ABSTRACT

Boiko D.A. The method of optimizing the digital transmission systems on the criterion of minimum error probability of transmission under restriction to the peak power and influence of the synchronization process. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.12.02 - Telecommunication systems and networks. - Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2012.

The thesis is devoted to developing and researching methods to improve noise immunity of digital communication systems with limited energy potential due to its optimal distribution between separate information and synchronizing channels, taking into account the parasitic processes. The developed methods and technical solutions allow to consider the influence of the quality of functioning of subsystem clock synchronization on the noise immunity of digital communication

systems, improve the accuracy of synchronization devices. It is shown that the use of the optimal distribution of energy potential between information and synchronizing channels can improve the noise immunity of digital communication systems.

Keywords: digital communication system, synchronization, optimization, interference immunity, energy potential, phase-locked loop, jitter, wander.

БОЙКО ДЕНИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396

**МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЗА
КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ЙМОВІРНОСТІ ПОМИЛКИ ПЕРЕДАЧІ
ПРИ ОБМЕЖЕННІ НА ПІКОВУ ПОТУЖНІСТЬ І ВПЛИВІ ПРОЦЕСУ
СИНХРОНІЗАЦІЇ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

зав. лаб. В.М. Головка

Підписано до друку «_____» _____ 20__ р.
Формат паперу 60x84 1/16. Папір офсетний
Умовн.-друк.арк. 0,9. Тираж 100. Замовлення № _____.

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного
транспорту, 61050, Харків – 50, пл. Фейєрбаха, 7
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.