

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

На правах рукописи

Бойко Денис Александрович

УДК 621.396

Метод оптимизации цифровых систем передачи по критерию минимума вероятности ошибки передачи при ограничении на пиковую мощность и влиянии процесса синхронизации

005.12.02 - телекоммуникационные системы и сети

диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
Алешин Геннадий Васильевич
доктор технических наук, профессор

Харьков – 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. Принципы синхронизации в цифровых телекоммуникационных системах и сетях передачи информации	10
1.1. Основные положения о синхронизации в цифровых системах и сетях передачи информации	11
1.1.1 Виды синхронизации в цифровых телекоммуникационных системах	11
1.1.2 Методы тактовой синхронизации в цифровых сетях передачи информации. Их преимущества и недостатки	12
1.1.3 Обоснование необходимости применения отдельного канала синхронизации	16
1.1.4 Устройства систем тактовой синхронизации и их параметры.	20
1.2 Принципы синхронизации плезиохронной цифровой иерархии PDH	27
1.3 Принципы синхронизации синхронной цифровой иерархии SDH	
1.4 Понятие джиттера, его классификация и причины возникновения	35
1.5 Помехоустойчивость ЦСП с учетом влияния качества функционирования системы синхронизации	39
1.6 Выводы	41
РАЗДЕЛ 2. Метод повышения помехоустойчивости цифровых систем передачи информации	43
2.1 Метод оптимального согласования параметров информационного и синхронизирующего каналов цифровых систем передачи по критерию минимума вероятности ошибки передачи	43
2.1.1 Оценка влияния качества функционирования систем синхронизации на помехоустойчивость цифровых систем передачи	43
2.1.2 Определение вероятности ошибочного принятия решения об информационном символе	48
2.1.3 Определение вероятности ухудшения качества работы ЦСП за счет неудержания тактовой синхронизации в заданной полосе	50

2.1.4 Постановка и решение задачи оптимизации распределения энергетического потенциала между информационным и синхронизирующим каналами при ограничении по пиковой мощности передатчика	52
2.2 Оптимальный метод и средство кодирования сигнала по критерию максимума энергетического потенциала канала синхронизации	64
2.3 Влияние погрешности фазовой синхронизации на качество ФАПЧ с синхронным детектором и схемой АРУ	72
2.4 Выводы	78
РАЗДЕЛ 3. Анализ влияния фазовых дрожаний и дрейфа фазы на помехоустойчивость цифровых систем связи	80
3.1 Влияние уровней порога и помех на параметры джиттера в цифровых системах	80
3.1.1 Влияние порога и помехи на относительную длительность выходного импульса.	81
3.1.2 Оценка влияния уровня и помехи на джиттер фронта выходного импульса.	91
3.2 Влияние вандера на помехоустойчивость системы передачи информации	95
3.3 Выводы	104
РАЗДЕЛ 4. Методы и средства повышения точности системы синхронизации, которые ослабляют влияние джиттера и обнаруживают вандер в канале синхронизации	106
4.1 Способы и методы компенсации джиттера гармоники тактовой частоты	107
4.2 Разработка помехоустойчивого фазового дискриминатора	116
4.3 Разработка устройства синхронизации тактовой частоты, способного компенсировать влияние джиттера и контролировать вандер гармоники тактовой частоты	121
4.4 Выводы	128
ВЫВОДЫ	129
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	130
Приложение А	142

ВСТУПЛЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Появление современных цифровых систем и сетей связи на базе оптоволоконных линий значительно повысило качество услуг связи и их функциональных возможностей. Перспектива развития цифровых систем и сетей основана на таких основных их преимуществах перед другими системами: 1) возможность полной автоматизации систем передачи информации и сетей и подсистем диспетчеризации, индикации, управления и регуляции режимов систем; 2) гибкость систем передачи относительно видов услуг, совмещения функций; 3) расширение возможностей использования имеющихся сетей за счет иерархии мультиплексирования; 4) универсализация и совмещение разных видов сетей; 5) возможность оптимальной маршрутизации сигналов; 6) возможность повышения помехоустойчивости за счет кодирования и преимуществ, которые связаны с использованием оптоволоконных линий.

В работе предполагается, что используется способ синхронизации генераторного оборудования с использованием отдельного синхронизирующего канала, целесообразность применения которого обосновывается в первом разделе данной диссертационной работы.

Известно огромное количество публикаций, посвященных разным видам, средствам, способам и системам синхронизации для систем связи различных типов. Известные ученые в этой отрасли при всех временах: Левин В.А., Капланов М. Р., Шахгильдян В.В., Евтянов С.И., Зюко А.Г., Свириденко С.С., Стиффлер Дж., Тихонов В.И., Тузов Г.Н., Гуткин Л. С., Шахтарин Б.И., Капранов Н.В., Мидлтон Д., Пратт В.К., Бакланов Н.Г., Скляр Б., Слепов Н.Н., и другие. Однако вопросам, посвященным влиянию систем синхронизации на помехоустойчивость, уделено недостаточно внимания.

Актуальность темы диссертационных исследований обусловливается необходимостью синтеза цифровых систем передачи (ЦСП) по критерию минимума вероятности ошибки передачи с учетом влияния канала синхронизации.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Исследования диссертационной работы выполнялись в соответствии со следующими нормативными актами.

1. Государственная научно-техническая программа "Создание перспективных телекоммуникационных систем и технологий".

2. Концепция создания Государственной интегрированной информационной системы обеспечения управления подвижными объектами (связь, навигация, наблюдение), одобренная распоряжением Кабинета Министров Украины от 17 июля 2003р. №410-р.

3. Государственная программа «Информационные и коммуникационные технологии в образовании и науке» на 2006-2010 годы, утвержденная постановлением КМУ от 7 декабря в 2005 г., №1153.

4. Закон Украины «Об основных принципах развития информационного общества в Украине на 2007 - 2015 годы» № 537-V от 09 января 2007 года.

Цель и задача исследований. Целью диссертационной работы является повышение помехоустойчивости ЦСП за счет оптимального распределения энергетического потенциала между информационным и синхронизирующим каналами по критерию минимума вероятности ошибки передачи при ограничении по пиковой мощности передатчика с учетом дестабилизирующих процессов в канале синхронизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести системный анализ влияния канала синхронизации на помехоустойчивость ЦСП с ограниченным энергетическим потенциалом;

2) выполнить оптимизацию ЦСП по критерию минимума вероятности ошибки передачи при ограниченном энергетическом потенциале с учетом влияния канала синхронизации и дестабилизирующих процессов в нем;

3) провести оценку влияния дестабилизирующей амплитудной модуляции сигнала на качество функционирования систем автоматической подстройки частоты (ФАПЧ);

4) провести системный анализ влияния джитера и вандера гармоника тактовой частоты в канале синхронизации на помехоустойчивость ЦСП;

Объектом исследования является процесс синхронизации и фазирования сигналов приемного генераторного оборудования.

Предметом исследования является метод оптимизации ЦСП по критерию минимума вероятности ошибки передачи при ограниченном энергетическом потенциале с учетом влияния дестабилизирующих факторов в канале синхронизации.

Методы исследования: методы теории электрической связи, теории сложных систем, теории вероятностей, методы математической статистики, методы математического анализа.

Научная новизна полученных результатов. Результатом диссертационной работы является постановка и решение задачи повышения помехоустойчивости ЦСП путем оптимального распределения энергетического потенциала между информационным и синхронизирующим каналами при ограничении по пиковой мощности передатчика с учетом влияния дестабилизирующих факторов. При этом получены следующие научные результаты.

1. Получил дальнейшее развитие метод распределения энергетического потенциала между информационным и синхронизирующим каналами цифровых систем передачи по критерию минимальной вероятности ошибки передачи, который отличается от известных учетом влияния ограничения по пиковой мощности передатчика, джиттера и вандера.

2. Получила дальнейшее развитие математическая модель оценки числовых характеристик системы ФАПЧ с задержкой в генераторном оборудовании ЦСП, которая отличается от существующих учетом влияния дополнительной амплитудной модуляции входного сигнала и помехи на джиттер сигнала с целью повышения точности оценки качества работы ФАПЧ.

3. Впервые получены зависимости числовых характеристик джиттера и вандера сигнала синхронизации от дисперсии помехи, которые в отличие от существующих позволяют учитывать их влияние на помехоустойчивость ЦСП.

Практическое значение полученных результатов исследований заключается в следующем.

1. Получены выражения для инженерных расчетов необходимого энергетического потенциала информационного и синхронизирующего каналов ЦСП на основе предложенного метода оптимального согласования параметров указанных каналов по критерию минимума вероятности ошибки передачи.

2. Предложено устройство инвертирования нулей манчестерского кода, которое гарантированно обеспечивает сохранение 50% энергии сигнала при выделении гармоники тактовой частоты.

3. Получены числовые характеристики джиттера и вандера сигналов, нестабильности амплитуды и флуктуационной составляющей фазы сигнала управляемого генератора, которые дают возможность оценивать

данные дестабилизирующие явления при модернизации существующих и разработке новых радиорелейных, тропосферных, спутниковых, оптических ЦСП с ограничением по пиковой мощности передатчика.

4. На основе методов компенсации влияния джиттера и вандера гармоника тактовой частоты предложены технические решения и алгоритм, которые дают возможность снизить влияние дестабилизирующих явлений на помехоустойчивость ЦСП.

Личный вклад автора. Основные результаты, методы системного анализа и синтеза цифровых систем, которые получены автором лично, изложены в пяти научных статьях, опубликованных в научных изданиях, которые входят в перечень ВАК Украины. В научных статьях, которые опубликованы в соавторстве, вклад автора заключается в следующем: [1] - предложен метод оптимизации помехоустойчивости ЦСП за счет перераспределения энергетического потенциала между информационным и синхронизирующим каналами, рассчитаны потери энергетического потенциала при использовании манчестерского кода; [2] - выполнена оценка влияния уровней порога и помех на статистические характеристики джиттера гармоника тактовой частоты в цифровых системах связи; [3] - выполнена оценка влияния погрешности фазовой синхронизации на качество ФАПЧ с синхронным детектором и схемой АРП; [4] - предложен метод оптимального согласования параметров информационного и синхронизирующего каналов ЦСП по критерию минимальной ошибки передачи.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и были одобрены на следующих научно технических конференциях:

- 22-й международной научно-практической конференции «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины», Алушта, 2009 г.;

- 5-й международной научно-практической конференции «Современные проблемы и достижения в отрасли радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий», Запорожье, 2010 г.;

- 23-й международной научно-практической конференции «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины», Алушта, 2010 г.;

- научно-практической конференции «Приложения информационных технологий в подготовке и деятельности сил охраны правопорядка», Харьков, 2011 г.;

- 19-й международной научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье», Харьков: НТУ «ХПИ», 2011 г.;

- 24-й международной научно-практической конференции «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины», Алушта, 2011 г.

Публикации. Результаты диссертационной работы изложены в 5 научных статьях, которые опубликованы в научных изданиях, которые входят в перечень ВАК Украины (3 статьи - в научных журналах, 2 статьи - в сборниках научных трудов), и шести тезисах докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из вступления, четырех разделов, выводов, списка использованной литературы и приложения.

Полный объем диссертации составляет 143 страницы, в том числе 46 рисунков, 1 приложение на 2 страницах, список использованной литературы содержит 123 наименования на 12 страницах. Диссертация написана на русском языке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. Евсеенко Г. Н. Цифровые системы передачи [Текст]: Учебное пособие / Г. Н. Евсеенко. — Ростов-на-Дону: РКСИ, 2005. — 100 с.
7. Емельянов Г.А. Передача дискретной информации [Текст]: Учебник для вузов/ Г.А. Емельянов, В.О. Шварцман. - М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.
8. Передача дискретных сообщений [Текст]: Учебник для вузов / В. П. Шувалов, Н. В. Захарченко, В. О. Шварцман и др.; под ред. В. П. Шувалова. — М.: Радио и связь, 1990. — 464 с.

9. Будылдина Н.В. Основы передачи дискретных сообщений [Текст]: Учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения / Н.В. Будылдина. – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2009. – 142 с.
10. Давыдкин П. Н. Тактовая сетевая синхронизация [Текст] / П. Н. Давыдкин, М. Н. Колтунов, А. В. Рыжков; под. ред. М. Н. Колтунова. - М.: Эко-Трендз, 2004. -205с.
11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст]: пер. с англ. / Б. Скляр. - 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
12. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM) [Текст] / Н.Н Слепов. – М.: Радио и связь, 2000. – 430 с.
13. Сухман С.М. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений [Текст] / С.М. Сухман, А.В. Бернов, Б.В. Шевкопляс. -М.: Эко-Трендз, 2003. -272 с.
14. Беллами Дж. Цифровая телефония [Текст] / Дж. Беллами; пер. с англ., ред. А.Н. Берлина, Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 640 с.
15. Левин Л.С. Цифровые системы передачи информации [Текст] / Л.С. Левин, М.А. Плоткин - М.: Радио и связь, 1982. — 216 с.
16. Щелованов Л.Н. Основы теории тактовой сетевой синхронизации [Электронный ресурс] / Л.Н. Щелованов, Г.С. Антонова, Е.М. Доронин, С.В. Рыжкова. – Режим доступа: <http://www.dvo.sut.ru/libr/opds/i052shel/index.htm>. - Загл. с экрана. (Дата обращения: 24.10.2011).
17. Синхронизация телекоммуникационных сетей. Сообщение по применению [Текст]. - 1264-1 Hewlett-Packard, 1995 – 26 с.
18. Стиффлер Дж. Дж. Теория синхронной связи [Текст]: пер. с англ./ Дж. Дж. Стиффлер. – М.: Связь, 1975. – 488 с.

19. Синхронные сети передачи данных [Текст] / В.О. Шварцман, Н.Н. Етрухин, М.А. Карпинский и др.; под ред. В.О. Шварцмана. – М.: Радио и связь, 1988. – 255 с.
20. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети [Текст]: учеб. пособие / В.Г. Фокин. - М.: Эко-Трендз, 2008. 284с.
21. Никитюк Л.А. Телекоммуникационные технологии цифровых сетей [Текст]: учеб. пособие / Л.А. Никитюк; под ред. Н.В. Захарченко. – Одесса: изд. УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 64 с.
22. Крук Б. И. Телекоммуникационные системы и сети [Текст]: в 2 т. Т. 1 / Б.И. Крук, В.Н. Попантонопуло, В.П. Шувалов. - 3-е изд., испр. и доп. - М: Горячая линия-Телеком, 2003 - 647 с.
23. Кунегин С.В. Системы передачи информации. Курс лекций [Электронный ресурс] / С.В.Кунегин. – Режим доступа: <http://kunegin.narod.ru/ref/sod lec.htm>. - Загл. с экрана. (Дата обращения: 24.10.2011).
24. Баркун М.А. Цифровые системы синхронной коммутации [Текст] / М.А. Баркун, О.Р. Ходасевич - М.: Эко-Трендз, 2001 – 190 с.
25. Слепов Н. Н. Синхронные цифровые сети SDH [Текст] / Н.Н. Слепов. - М.: ЭКО-ТРЕНЗ, 1997. – 148 с.
26. Хмелёв К. Ф. Основы SDH [Текст]: [монография] / К. Ф. Хмелёв . - К.: ИВЦ «Видавництво "Політехніка"», 2003.-584 с.
27. ITU-T Recommendation G.811. Timing Requirements at the Outputs of Primary Reference Clocks Suitable for Plesiochronous Operation of International Digital Links (1997).
28. ITU-T Recommendation G.812. Timing Requirements at the Outputs of Slave Clocks Suitable for Plesiochronous Operation of International Digital Links (1988).
29. Попов Г.Н. Расчет и измерение качественных показателей транспортной сети [Текст]: учебное пособие / Г.Н. Попов, О.П. Клеша. - Новосибирск: изд СибГУТИ, 2002 – 104 с.

30. Системи передавання цифрові. Норми на параметри основного цифрового каналу і цифрових трактів первинної мережі зв'язку України [Текст]. - КНД 45-074-97.
31. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи [Текст] / И.Г. Бакланов . – М.: «Эко-трендз», Москва 1999. – 195 с.
32. Спилкер.Дж. Цифровая спутниковая связь [Текст] / Дж. Спилкер; пер. с англ., ред. В.В. Марков. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
33. Зюко А.Г. Теория электрической связи [Текст]: учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1999 – 432с.
34. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст] / Л.Е. Варакин. - М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.
35. Свириденко С.С. Основы синхронизации при приеме дискретных сигналов [Текст] / С.С. Свириденко. – М.: Связь, 1974. - 143 с.
36. Альошин Г.В. Оцінка якості інформаційно-вимірювальних систем [Текст] / Г.В. Альошин. - Харків, УкрДАЗТ, 2008, 300 с.
37. Алешин Г.В. Оптимальное совмещение информационного и синхронизирующего каналов в системах связи [Текст] / Г.В. Алешин , А.И. Солонец // Сб.науч.трудов. НАНУ, ХВУ, 1996. – С. 7-15.
38. Тузов Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах [Текст] / Г.И. Тузов. - Сов. радио, 1967. - 255 с.
39. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флюктуаций в радиотехнике [Текст] / Р.Л. Стратонович. - Москва: издательство «СОВЕТСКОЕ РАДИО», 1961. - 558 с.
40. Прием и обработка информации. Курсовое проектирование устройств приема и обработки информации [Текст]: учебное пособие / Д.А. Бакеев, А.А. Дуров, С.Г. Ильюшко, В.А. Марков, А.И. Парфенкин. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007 – 151 с.

41. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]: учебник для вузов / И.С. Гоноровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - М., «Сов. радио», 1977 – 608 с.

42. Женко Л.А. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте [Текст]: учебное пособие / Л.А. Женко. – Самара: СамГАПС, 2005. - 106с.

43. Теория электрической связи [Текст]: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с

44. А.с. 464858 СССР, МПК G 01 25/00 Цифровой фазовый детектор [Текст] / Алешин Г.В., Урвачев В.И. (СССР) – 1932512; Заявлено 08.06.1973; Опубл. 25.03.75. Бюл. – 3 с.: ил.

45. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю.В. Линник. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958, 336 с.

46. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи [Текст] / С. Брени. - Москва: Мир. – 2003, 444 с.

47. Ширман Я.Д. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров [Текст] / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, 1962. – 203 с.

48. Капланов М.Р. Автоматическая подстройка частоты [Текст] / М.Р. Капланов, В.А. Левин. - М.-Л., Госэнергоиздат, 1953. – 176 с.

49. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты [Текст] / В.В. Шахгильдян. - М., «Связь», 1972. – 447 с.

50. Системы фазовой синхронизации [Текст] / В.Н. Акимов, Л.Н. Белюстина, В.Н. Белых и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.

51. Система фазовой автоподстройки частоты: Методические указания к лабораторным работам [Текст] / К.К. Васильев, С.В. Елягин. – Ульяновск: Ул ГТУ, 2001. – 15 с.

52. Адаптивная компенсация помех в каналах связи [Текст] / Ю.И. Лосев, А.Г. Бердников, Э.Ш. Гойхман, Б.Д. Сизов; под ред. Ю.И. Лосева. - М., " Радио и связь", 1988. – 208 с.

53. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования [Текст] / И.А. Липкин. – М.: «Вузовская книга», 2002. – 216 с.

54. Булатов В.Н. Элементы и узлы информационно-управляющих систем (основы теории и синтеза) [Текст]: учебное пособие / В.Н. Булатов. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 200 с.

55. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. - 3-е изд., испр. - издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1975. - 768 с.

56. Ротков Л.Ю. Современные сетевые технологии, технологии Интернет [Текст] / Л.Ю. Ротков. - Нижний Новгород, 2001 г – 219 с.

57. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений [Текст] / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. - Физматгиз, 1963. – 1109 с.

58. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении [Текст] / В. Линдсей; пер. с англ. Ю.Н. Бакаева и М.В. Капранова. – М.: Сов. Радио, 1978. – 600 с.

59. Марченко Ю.Н. Конспект лекций по курсу «Теории автоматического регулирования» [Текст] / Ю.Н. Марченко. - Новокузнецк, 2002. - 69 с.

60. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений [Текст]: пер. с англ. / Ф. Мейзда. – Мир, 1990. – 535 с.

61. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления [Текст]: учеб. пособие / Е.П. Попов.— 2-е изд., стер.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1988.—256 с.

62. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления [Текст]: учеб. пособие для вузов / Е.П. Попов.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989.— 304 с.

63. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры [Текст] / А.Л.Фрадков. - СПб.: Наука, 2003. – 208 с.

64. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст]: пер. с англ. / Б. Куо. — М.: Машиностроение, 1986. — 448 с.

65. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика [Текст]: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника» / Г.Ф.Коновалов. – М.: Высш. Шк., 1990. – 355 с.

66. Теория автоматического управления [Текст]: учеб. для ТЗЗ вузов по спец. «Автоматика и телемеханика» в 2-х ч. Ч. 1. (Теория линейных систем автоматического управления) / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; под ред. А. А. Воронова.—2-е изд., перераб. и доп. — Москва: издательство Высшая школа, 1986. — 367 с.

67. Наладка средств измерений и систем технологического контроля [Текст]: Справочное пособие / А. С. Ключев, Л. М. Инн, Е. И. Коломиец, С. А. Ключев; под ред. А. С. Ключева. — 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Энергоатомиздат, 1990. —400 с.

68. Михайлов В. С. Теория управления [Текст] / В.С. Михайлов. - Киев, издательство Выща школа. Головное изд-во, 1988. — 312 с.

69. Первачев С.В. Радиоавтоматика [Текст]: Учебник для вузов / С.В. Первачев. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.

70. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи [Текст] / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

71. Вагапов В.Б. Автоматика радиоэлектронных систем [Текст] / В.Б. Вагапов. – К.:Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 351 с.

72. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст] / Ф. Чаки; пер с англ. В. В. Капитоненко и С. А. Анисимова; под ред. Н. С. Райбмана. — Москва: издательство «МИР», 1975. - 422 с.

73. Ларцева Т.А. Анализ систем взаимной синхронизации цифровой сети связи, состоящей из трех узлов [Текст] / Т.А. Ларцева // Техника средств связи № 2 (35), 1979. – С. 67-74.

74. Матюхин А.Ю. Оптимальная обработка цифровых сигналов в условиях фазовых дрожаний [Текст] / А.Ю. Матюхин // ИНФОРМОСТ Радиоэлектроника и телекоммуникации № 5 (35), 2004 – С 61-64.

75. Каляка А. Синхронизация телекоммуникаций от Semtech, аппаратное обеспечение [Текст] / А. Каляка // КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ № 7, 2005.

76. Слепов Н.Н. Синхронизация цифровых сетей. Методы, терминология, аппаратура [Текст] / Н.Н. Слепов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, технология, бизнес № 2, 2002.

77. Гайдаманчук В.А., Савчук А.В. Особенности синхронизации сетей следующего поколения: новые проблемы и новые достижения [Текст] / В.А. Гайдаманчук, А.В. Савчук // ЗВ'ЯЗОК № 4, 2006.

78. Тихонов В.И. Влияние шумов на работу схемы фазовой автоподстройки частоты [Текст] / В.И. Тихонов // Автоматика и телемеханика. – 1959. - №9. – С. 1188-1196.

79. Тихонов В.И. Работа фазовой схемы фазовой автоподстройки частоты при наличии шумов [Текст] / В.И. Тихонов // Автоматика и телемеханика. – 1960. - №3. – С. 301-309.

80. Витерби А. Исследование динамики систем фазовой автоподстройки частоты в присутствии шумов с помощью уравнения Фоккера-Планка [Текст] / А. Витерби // ТИИЭР. – 1963. – Т. 51, №12. С. 1704-1722.

81. Стратонович Р.Л. Синхронизация автогенератора при наличии помех [Текст] / Р.Л. Стратонович // Радиотехника и электроника, т. 3, №4, 1958. – С. 4.

82. Капранов М.В. Полоса захвата при фазовой подстройке частоты [Текст] / М.В. Капранов // Радиотехника, т. 11, №12, 1956 – С.37-52.

83. Артым А.Д. Применения фазовой автоподстройки частоты [Текст] / А.Д. Артым // Радиотехника, т. 13, №8, 1958. - С. 37-46.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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 «ХПІ», 2011 р. – С. 90.

90. Сизов В.П. Синтез оптимальных линейных моделей фазовой автоподстройки частоты [Текст] / В.П. Сизов // Радиотехника и электроника. – 1973. – № 12. – С. 2529–2537.

91. Сизов В.П. Синтез оптимальных линейных моделей цифровых систем фазовой автоподстройки [Текст] / В.П. Сизов // Радиотехника и электроника. – 1974. – № 9. – С. 1886–1893

92. Шахтарин Б.И. Случайные процессы в радиотехнике [Текст]: Учебное пособие / Б.И. Шахтарин. – М.: Радио и связь, 2000. – 584 с.

93. Миддлтон Д. Очерки теории связи [Текст] / Д. Миддлтон. - М.: Советское радио, 1966. – 162 с.

94. Журавлев В.И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах [Текст] / В.И. Журавлев. – М.: Радио и связь, 1986.– 240 с.

95. Пратт В. К. Лазерные системы связи [Текст] / В.К. Пратт; пер. с англ. под ред. А. Г. Шереметьева. - М.: Связь, 1972. – 232 с.

96. Аналоговые и цифровые синхронно–фазовые измерители и демодуляторы [Текст] / А.Ф. Фомин, А.И. Хорошавин, О.И. Шелухин; под ред. А.Ф.Фомина. – М.: Радио и связь, 1987. – 248 с.

97. Цифровые системы фазовой синхронизации [Текст] / М.И. Жодзишский, С.Ю. Сила–Новицкий, В.А. Прасолов и др.; под ред. М.И. Жодзишского. – М.: Сов. Радио, 1980. –208 с.

98. Цифровые радиоприемные системы [Текст]: Справочник. / М.И. Жодзишский, Р.Б. Мазепа, Е.П. Овсянников и др.; под ред. М.И. Жодзишского – М.: Радио и связь, 1990. – 208с.
99. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи [Текст] / Э.Д. Витерби. – М.: Советское радио, 1970.–350 с.
100. Roland E. Best. Phase-locked loops: design, simulation, and application [Text] / E. Roland. - Third Edition. – McGraw-Hill, 1997. – 360 p.
101. Тихонов В.И. Марковские процессы [Текст] / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 525 с.
102. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника [Текст] / В.И. Тихонов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
103. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст]: Учебное пособие / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
104. Феер К. Беспроводная цифровая связь [Текст] / К. Феер; пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
105. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации при наличии помех [Текст] / Б.И. Шахтарин. – М.: ИПРЖР, 1996. – 252 с.
106. Шахтарин Б.И. Статистическая динамика систем синхронизации [Текст] / Б.И. Шахтарин. – М.: Радио и связь, 1998. – 488 с.
107. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами [Текст] / Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др.; под ред. Г.И. Тузова – М.: Связь, 1985. – 279 с.
108. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации методом усреднения [Текст] / Б.И. Шахтарин. – М.: Радио и связь.–1999. – 496 с.
109. Обрезков Г.В. Методы анализа срыва слежения [Текст] / Г.В. Обрезков, В.Г. Разевиг. – М.: Советское радио, 1972.
110. Meyr H. Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing [Text] / H. Meyr, M. Moeneclaey, S. Fechtel. - John Wiley & Sons, Inc. –1998. – 829 p.

111. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования [Текст] / Г.Деч.– М.: Наука, 1971. – 288 с.

112. Казаков Л.Н. Математическое моделирование дискретных систем с частотным управлением [Текст]: учеб. пособие / Л.Н. Казаков. - Яр. гос. ун-т им. П.Г. Демидова.– Ярославль, 1993. – 44 с.

113. Weinberg A. Time Analyses of Nonuniform Sampling First–and Second–Order Digital Phase Lock Loops [Text] // A. Weinberg, B. Liu. - IEEE Trans. –1974. –V. COM–22. –№2. 123–137.

114. Aviv D.G. Laser Space Communications [Text] / D.G.Aviv. - Artech House, 2006. - 216p.

115. Казаков Л.Н. Математические модели стохастических цифровых систем фазовой синхронизации [Текст]: Учеб. пособие / Л.Н. Казаков, М.В. Башмаков. - Яр. гос. ун-т им. П.Г. Демидова.– Ярославль, 2001.– 135 с.

116. Капранов М.В. Теория колебаний в радиотехнике [Текст] / М.В. Капранов, В.Н. Кулешов, Г.М. Уткин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

117. Бахвалов Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 632 с.

118. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. –М.: Наука, 1977. – 832 с.

119. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения [Текст] / В.Феллер. – М.: Мир, 1964. – 498 с.

120. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы [Текст] / В.А. Бесекерский. – М.: Наука, 1976. – 576 с.

121. Мельникова Н.Ф. Сетевые нормы на дрожание и дрейф фазы первичного эталонного генератора. Принципы их применения и измерения в соответствии со стандартом ETS 300 462–3 (01/97) [Текст] / Н.Ф. Мельникова // Метрология и измерительная техника в связи. – 2000. – № 1. – С. 9–18.

122. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11 [Текст] / В.П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 832 с.

123. Вычисления в пакете MathCad. Описание пакета Mathcad. [Текст]: учеб. пособие для самост. Работы / В.Д. Бертяев, Л.А. Булатов, Д.В. Комолов, Д.Ю. Сазонов. – Тула, ТИЭИ, 2007. –244с.