

На правах рукописи

УДК 621.396

Рязанова Мария Алексеевна

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА
СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ И ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах).

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МОСКВА, 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель -

Шахтарин Борис Ильич,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
лауреат Государственной премии СССР

Научный консультант:

к.т.н., доц. Чернышов Ю.Н.

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф.

Медведев Владимир Степанович
к.ф.-м.н., **Чернояров Олег Вячеславович**

Ведущая организация:

ФГУП «НПП «Дельта»

Защита состоится «17» мая 2011 г. в 14:30 часов

на заседании диссертационного Совета Д 212.141.02 при

Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана,

по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская, д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «11» апреля 2011 г.

Учёный секретарь

диссертационного Совета



к.т.н., доц. **Муратов И.В.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные системы и устройства управления, навигации и радиолокации, а также информационно-измерительные комплексы широко применяют системы синхронизации (СС). Эти системы выполняют многочисленные задачи; к числу наиболее распространенных из них относятся: синхронизация и демодуляция двоичных символов цифровой информации, измерение частоты и фазы сигналов, тактовая синхронизация, синтез сложных радиотехнических сигналов, синтез сетки высокостабильных частот, стабилизация частот генераторов различных диапазонов, когерентная демодуляция аналоговых и цифровых сигналов с частотной и фазовой модуляцией.

Повсеместное внедрение цифровых систем синхронизации (ЦСС) привело к повышению эффективности перечисленных выше устройств. При этом повысились точность и надежность СС, увеличились их быстродействие и помехоустойчивость. В тоже время усложнились алгоритмы обработки информации, а также программы оптимизации параметров СС и устройств в целом.

Особое значение при проектировании и создании СС имеют проблемы оценки устойчивости этих систем при воздействии помех различного рода. При этом статистические моменты фазовой и частотной ошибок слежения (среднее и среднеквадратическое значения) не дают полной информации о поведении СС. Поскольку СС – существенно нелинейная система, то в ряде случаев необходимо знание плотностей распределения вероятностей (ПРВ) переменных состояния. Особенностью СС с рядом других систем (не фазовых) является существование множества устойчивых состояний равновесия, а в отдельных предельных случаях и устойчивых периодических движений 1-го и 2-го рода, что еще более усложняет картину при действии шумов.

Исследования СС существенно усложняются, если наряду с шумовой (флуктуационной) помехой на СС воздействует узкополосная негауссовская помеха. Здесь особенно важным является исследование СС при воздействии гармонических помех. К таким помехам относятся помехи соседних каналов в системах радиосвязи, помехи многолучевости, помехи космическим навигационным системам (GPS и ГЛОНАСС), организованные помехи радиолокационным станциям.

Основным методом исследования СС при наличии гауссовского шума на входе в настоящее время является метод марковских случайных процессов. Пионерами использования этих методов применительно к СС являются Р.Л.Стратонович и В.И.Тихонов. Существенный вклад в развитие теории синхронизации при наличии гауссовского шума на входе сделали Б.И. Шахтарин, В. Линдсей, А. Витерби, Дж. Холмс, В.Д. Шалфеев, Н.Н. Удалов, В.Н. Белых, В.Н. Кулешов, В.Д. Разевиг, В.В. Шахгильдян, А. Вайнберг и другие. В результате к настоящему времени теория непрерывных СС при наличии шумовых воздействий в основном завершена. В то же время теория дискретных систем синхронизации (ДСС) даже при шумовых воздействиях

разработана весьма незначительно. И если в непрерывных СС достаточно подробно методом марковских процессов исследованы системы 1, 2-го порядков, применительно к ДСС – это в основном касается систем только 1-го порядка. Такие исследования выполнены М.И. Жодзишским, В.Н. Кулешовым, В.В. Шахгильдяном, Б.И. Шахтариним, В.Н. Белых, В.П. Сизовым, Дж. Холмсом, Х. Осборн, С. Гуптой.

Исследованиям дискретных СС в условиях даже простейших узкополосных помех посвящено ограниченное число работ. Одной из первых работ, где рассмотрены комбинированные воздействия на непрерывную СС (сигнал + шум + гармоническая помеха) является статья Журавлева А.Г.

Подобную ситуацию можно объяснить следующими причинами. Во-первых, представляет собой достаточно серьёзную проблему переход к марковским моделям, не существует общей методики перехода; ситуация значительно усложняется в условиях узкополосных воздействий. Во-вторых, необходимо обеспечить строгий переход от марковской модели к векторному уравнению Колмогорова - Чепмена, корректно подстроив условную плотность вероятности перехода; сложность вызвана периодическим характером нелинейности. В-третьих, усложняется задача о среднем времени до срыва слежения. Даже наличие простого сигнала без помехи, но с изменяющейся частотой, существенно усложняет решение задачи о срыве.

Очевидно, что результатов исследования даже непрерывных СС при комбинированных воздействиях в настоящее время явно недостаточно. Кроме того, необходимо разрабатывать теорию ДСС, включая цифровые, при комбинированных воздействиях.

В связи с вышеизложенным, тема диссертации, посвященной разработке алгоритмов анализа систем синхронизации при воздействии гармонических и шумовых помех, является достаточно актуальной.

Задачи, решаемые в диссертации. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Разработка математических моделей ряда непрерывных и дискретных СС с учетом воздействия на них как шумовых, так и гармонических воздействий.
2. Разработка алгоритмов анализа статистических характеристик СС при комбинированном воздействии шумовых и гармонических помех.
3. Разработка методики решения интегрального уравнения Колмогорова-Чепмена приближёнными методами, описывающего состояние СС.
4. Исследование ДСС первого порядка приближённым методом Галёркина.
5. Анализ плотности распределения вероятности (ПРВ) фазовой ошибки в непрерывной системе при комбинированном воздействии помех приближённым методом.
6. Анализ двухконтурной СС (схемы Костаса) и получение ее статистических характеристик.

Положения, выносимые на защиту.

1. Марковские модели ряда непрерывных и дискретных СС при комбинированных воздействиях в виде смеси полезного колебания, детерминированной помехи и широкополосного гауссовского шума.
2. Методика приближенного исследования методом гармонического баланса и усреднения непрерывных СС при комбинированном воздействии.
3. Разработанные разностные схемы уравнений ФПК и уравнений Понтрягина, позволяющие численно находить ПРВ сигнала рассогласования в переходном режиме, а также среднее время и вероятность до срыва слежения.
4. Алгоритмы анализа статистических и динамических характеристик ДСС 1-го и ДСС 2-го порядков.
5. Сравнительные характеристики ДСС 1-го и ДСС 2-го порядков.
6. Результаты исследований статистических характеристик двухконтурной СС (схемы Костаса).

Научная новизна результатов.

1. Разработана разностная схема уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) и уравнение Понтрягина, позволяющие получать ПРВ сигнала рассогласования в переходном режиме, а также численно находить среднее время и вероятность до срыва синхронизации.
2. Получены статистические характеристики фазового рассогласования ДСС 1 и 2-го порядка, дисперсии фазовой ошибки слежения при использовании метода Галёркина и численно-аналитических методов.
3. За счёт применения имитационной модели СС и разработанных методик, в отношении ряда систем получены уточняющие данные по сравнению с известными результатами.
4. Получены области применения приближённых методов при анализе дискретных СС 1-го порядка.
5. Приближенным методом гармонического баланса получены динамические характеристики непрерывных СС и на их основе и с использованием метода усреднения исследованы статистические характеристики этих систем.
6. Разработана модель двухконтурной схемы синхронизации в виде схемы Костаса при комбинированном воздействии и найдена дисперсия сигнала фазового рассогласования при двух моделях сигнальной формы.

Общая методика исследований. Разрабатываемые в диссертации методы анализа динамических и статистических характеристик непрерывных и дискретных СС базируются на общих положениях качественных методов теории систем автоматического управления и теории разностных уравнений, теории марковских процессов и цепей.

Для решения поставленных задач используется компьютерное моделирование, численное решение нелинейных стохастических разностных уравнений.

Разработанные методы и алгоритмы анализа статистических характеристик непрерывных и дискретных, в том числе и цифровых, СС ориентированы на использование персональных компьютеров.

Практическая ценность диссертации

1. В диссертации разработаны имитационная модель СС и методики исследования, позволяющие определить основные статистические характеристики различных непрерывных и дискретных СС. Разработаны алгоритмы для расчёта статистических характеристик; созданные автором программы апробированы в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институте криптографии, связи и информатики Академии ФСБ России, в С.-Петербургском Государственном Университете аэрокосмического приборостроения, а также в ОАО «Концерн «Созвездие».
2. На основе разработанных методик и алгоритмов автором создано программное обеспечение для анализа статистических характеристик различных непрерывных и дискретных систем. Разработанные программы позволяют оптимизировать параметры фильтра в цепи управления с целью обеспечения заданных статистических свойств непрерывных и дискретных СС при воздействии полезного сигнала и помехи.
3. Предложенные и развитые в диссертации методики и разрабатываемые на их основе алгоритмы и программы могут быть использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для анализа статистических свойств непрерывных, дискретных СС и синтеза дискретных СС различного назначения.

Внедрение результатов работы осуществлено в:

1. НИР «Перспектива - СЧ» (ОАО «Концерн Созвездие»).
2. НИР [Синхронизация в радиосвязи и навигации, 2007 г., ГР 01200710182], на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им Н.Э. Баумана.
3. Учебные процессы.
 - 3.1. Лабораторные работы на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им Н.Э. Баумана.
 - 3.2. Учебное пособие [6].
 - 3.3. Институт криптографии, связи и информатики (ИКСИ) Академии ФСБ.
 - 3.4. С.-Петербургский Государственный Университет аэрокосмического приборостроения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технической конференции РНТОР и ЭС им. А.С. Попова, 2008, вып. №63, с.268-270., на семинарах кафедры СМ-5 МГТУ им. Н.Э.Баумана, а также на научных семинарах кафедры «Компьютерной математики и программирования» ГУАП (С.-Петербург, 2009 и 2010 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 9 работах, из них 1 отчет по НИР и 4 работы опубликовано в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК.

Объём и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы (80 наименований), приложения и изложена на 163 листах машинописного текста, включая 48 листов иллюстраций.

Основное содержание работы.

Во введении дана общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования, кратко изложено содержание работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выводятся основные соотношения для моделей непрерывной и дискретной СС в форме ДУ и разностных уравнений (РУ), учитывающих комбинированные воздействия в форме аддитивной смеси сигнала, шума и гармонических помех.

Структурная схема непрерывной системы синхронизации (ФАП) изображена на рис. 1.

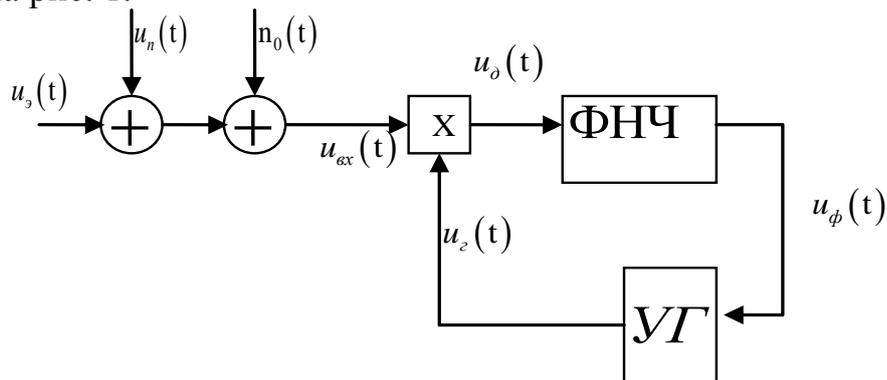


Рис. 1

На вход ФАП поступает аддитивная смесь (рис. 1)

$$u_{вх}(t) = u_3(t) + u_n(t) + n_0(t), \tag{1}$$

полезного сигнала (эталонного колебания) $u_3(t)$, гармонической помехи $u_n(t)$ и полосового (белого) гауссовского шума ГБШ $n_0(t)$.

Эталонное колебание имеет вид

$$u_3(t) = \sqrt{2}A \sin(\omega_0 t + \Omega_0 t + \theta_0)$$

где A – среднеквадратическое значение напряжения полезного сигнала, ω_0 – частота сигнала, совпадающая с начальной частотой управляемого генератора (УГ), Ω_0 и θ_0 – начальные расстройки по частоте и фазе между эталонным колебанием и сигналом на выходе УГ.

Гармоническая помеха принимается в виде

$$u_n(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2} \sin(\omega_0 t + \Omega_i t + \theta_i),$$

где N – число спектральных составляющих, попадающих в полосу пропускания линейного тракта, предшествующего ФАП; A_i - среднеквадратическое значение напряжения i -ой спектральной составляющей; Ω_i и θ_i начальные расстройки по частоте и фазе i -ой составляющей относительно частоты и фазы на входе УГ.

Полосовой гауссовский шум имеет вид

$$n_0(t) = \sqrt{2}n_c(t) \cos \omega_0 t + \sqrt{2}n_s(t) \sin \omega_0 t,$$

где $n_c(t)$ и $n_s(t)$ - независимые квадратурные гауссовские случайные процессы.

Напряжение на выходе УГ имеет вид $u_z(t) = \sqrt{2}A_z \cos(\omega_0 t + \varphi_0(t))$.

В результате преобразований получено стохастическое дифференциальное уравнение (ДУ) в символической форме

$$\frac{1}{KA} px = \gamma - F(p) \left[\sin x + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \sin(x + \Delta\Omega_i + \Delta\theta_i) + \frac{1}{A} n_{uu}(t) \right], \quad (2)$$

где $\gamma = \Omega_0 / KA$; $\varepsilon_i = A_i / A$; $\Delta\Omega_i = \Omega_i - \Omega_0$; $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_0$; $i = \overline{1; N}$; $F(p)$ - передаточная функция ФНЧ.

Низкочастотный шум $n_{uu}(t)$ в пределах полосы пропускания ФАП является гауссовским шумом, который моделируется гауссовым белым шумом (ГБШ) с двусторонней спектральной плотностью $N_0/2$ (Вт/Гц).

Помимо модели СС рис.1 в диссертации используется также двухконтурная СС (схема Костаса) (рис.2), на выход которой подается комбинированное воздействие в виде (1).

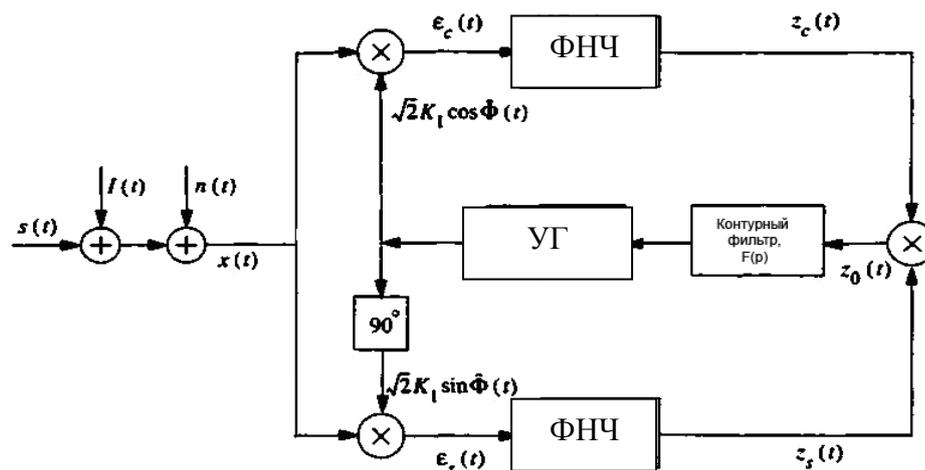


Рис. 2

Дискретная модель СС имеет вид дискретного аналога схемы Костаса.

Разностное уравнение РУ дискретной модели имеет вид

$$x(k+1) = \bar{\omega}_n T_0 + x(k) + \theta_c(k+1) - \theta_c(k) - K_u K_\phi(z) A_o A_y A \{ \sin(x(k)) + \frac{n(k)}{A} + \sum_i \frac{A_i}{A} \sin(x(k) + \beta_i k T_0 + \theta_i(k) - \theta_c(k)) \} \quad (3)$$

В первой главе представлена разработанная автором имитационная Simulink – модель системы СС (рис.3), которая является в частности средством визуализации процессов СС (см. рис.4).

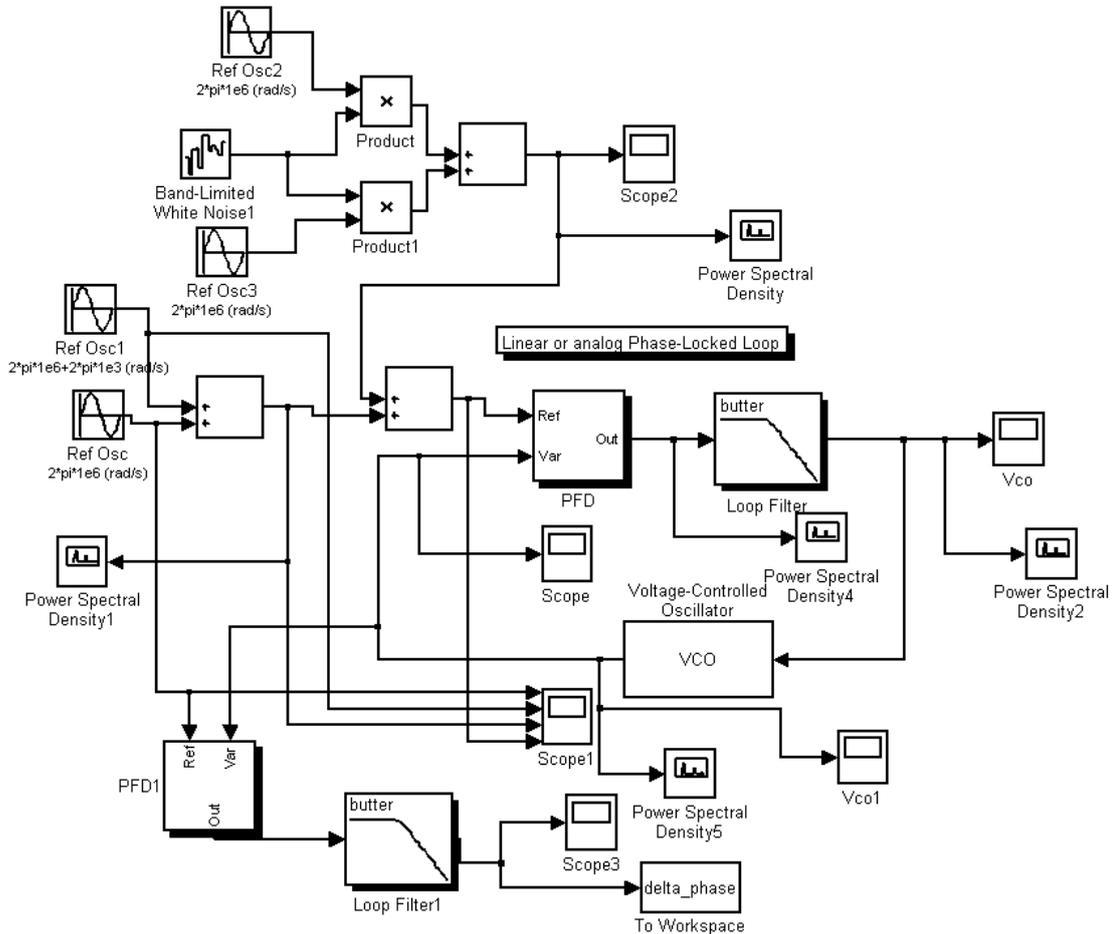


Рис. 3

Управляющее напряжение УГ:

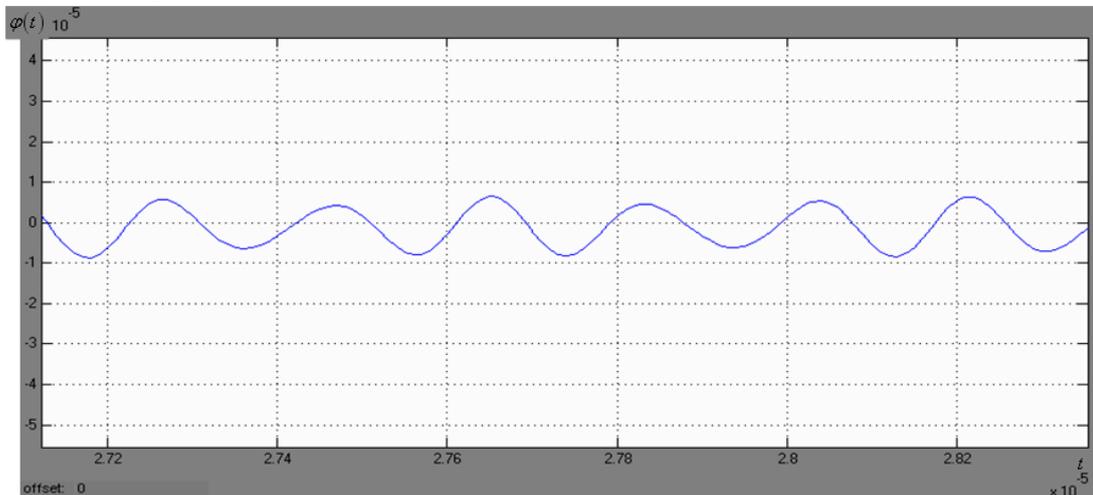


Рис. 4

Вторая глава посвящена исследованию непрерывной СС при воздействии единичной детерминированной гармонической помехи при отсутствии шума. Использован метод гармонического баланса для получения динамических характеристик СС. Найдены критические значения параметров колебания. В этом случае моделью СС служит ДУ при $i=1$; $n_{ш}(t)=0$.

$$\frac{1}{K\sqrt{S}} \frac{dx}{dt} = \gamma - F(p) [\sin x + \varepsilon \sin(x + \Delta\Omega t + \Delta\theta)]. \quad (4)$$

Предполагаемое решение ДУ (4) аппроксимируется двумя слагаемыми

$$x(t) = x_0 + x_1 \cos(\Delta\Omega t + \Delta\theta + \psi) = x_0 + x_1 \cos(\theta + \psi), \quad (5)$$

где $\theta = \theta(t) = \Delta\Omega t + \Delta\theta$, а параметры колебания x_0 , x_1 , ψ подлежат определению.

В предположении малой амплитуды x_1 , когда выполняются условия

$$\sin x \approx \sin x_0 + x_1 \cos x_0 \cos(\theta + \psi); \quad \cos x \approx \cos x_0 - x_1 \sin x_0 \cos(\theta + \psi),$$

после подстановки (5) в ДУ (4) и последующей процедуры гармонического баланса находятся искомые параметры колебания

$$x_1^2 = \varepsilon^2 \Delta^{-1} M^2(\Delta\Omega), \quad (6)$$

где

$$\Delta = \left\{ \left[M(\Delta\Omega) \frac{\cos x_0}{d} + \sin(P(\Delta\Omega)) \right]^2 + \cos^2(P(\Delta\Omega)) \right\} d^2, \quad (7)$$

$$\sin x_0 = \frac{\gamma}{M(0)} - \frac{x_1^2 D \cos P(\Delta\Omega)}{2 M(\Delta\Omega)},$$

а также уравнение относительно фазы ψ .

В соотношениях (6) и (7) $M(\Delta\Omega) = |F(i\omega)|$; $P(\Delta\Omega) = \arg F(i\omega)$; $d = \frac{\Delta\Omega}{KA}$.

Зависимость амплитуды x_1 первой гармоники предполагаемого решения (5) изображена на рис. 5 для случая системы первого порядка при $\gamma = 0.5$,

$\varepsilon^2 = 0,2; 0,5; 1; 1,5$ значения $\lambda = \frac{\Delta\Omega}{B_L}$, где B_L - шумовая полоса ФАП.

Штриховыми линиями обозначены асимптотические значения амплитуды x_1

$$x_1 = \frac{4\varepsilon}{\lambda}.$$

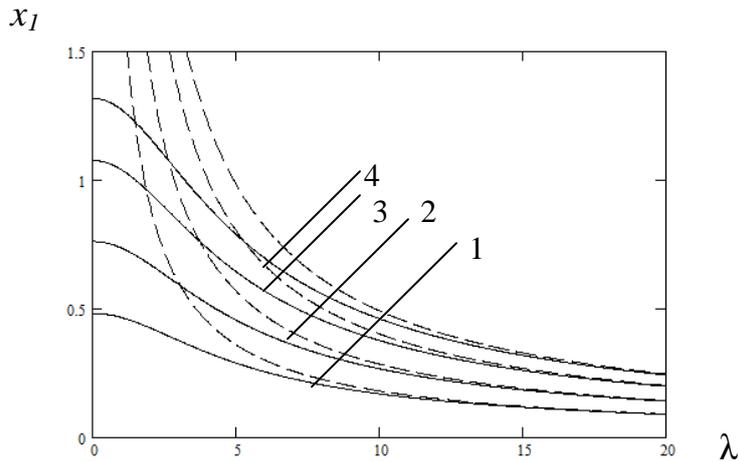


Рис. 5

Найдены критические значения отношения помеха/сигнал (ОПС) $\varepsilon = \varepsilon_k$ и амплитуды $x_1 = x_{1k}$, характеризующих срывы синхронизации.

Показано, что подверженность СС помехе увеличивается, если спектральное положение помехи и сигнала находится на противоположных сторонах от частоты покоя управляемого генератора.

В третьей главе рассматривается статистическая динамика непрерывной СС на основе метода гармонического баланса, разработанного в предыдущей главе, но с учетом всех трех составляющих комбинированного воздействия (сигнала, помехи и шума), так и с использованием других методов получения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК).

Получены ПРВ сигнала фазового рассогласования в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ) и помеха/сигнал (ОПС), а также от величины динамических параметров СС (частотных расстроек, параметров ФНЧ). Исследуются срывы слежения в непрерывной СС при комбинированных воздействиях.

Сначала рассматривается получение уравнения ФПК на основе аппроксимации решения стохастического ДУ (2) в форме (5), но в предположении медленного изменения первого слагаемого (5) $x_0 = x_0(t)$. При этом показано, что стохастическое ДУ СС принимает вид

$$\frac{1}{KA} \frac{dx_0}{dt} = \gamma - F(p) \{ [J_0(x_1) + \varepsilon J_1(x_1) \sin \psi_1] \sin x_0 + \varepsilon J_1(c_1) \cos \psi_1 \cos x_0 + \frac{1}{A} n_{uu}(t) \}, \quad (8)$$

где $J_0(x_1)$ и $J_1(x_1)$ - функции Бесселя порядка 0 и 1 соответственно.

В случае СС первого порядка найдено уравнение ФПК вида

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ W(x, t) [J_0(x_1) \sin x - \gamma + \varepsilon J_1(x_1)] \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где $W = W(x, t)$ - искомая ПРВ; $x \equiv x_0(t)$ - марковский случайный процесс; $|x| \leq \pi$; r - ОСШ на выходе СС.

Решение уравнения (9) в стационарном режиме (когда $\frac{\partial W}{\partial t} = 0$) имеет вид

$$W(x) = A e^{\nu x - \rho G(x)} \int_x^{x+2\pi} e^{-\nu u + \rho G(u)} du, \quad (10)$$

где A – постоянная интегрирования, $\nu = \bar{\gamma} r$; $\bar{\gamma} = \gamma - \varepsilon J_1(x_n)$; $\rho = r J_0(x_1)$; $G(u) = 1 - \cos u$; $A = A(\nu, \rho) = C(\nu, \rho) / (1 - e^{-2\pi\nu})$; $C(\nu, \rho) = \frac{sh\pi\nu}{2\pi^2 |I_{i\nu}(\rho)|^2}$,

где $I_{i\nu}(\rho)$ – модифицированная функция Бесселя чисто мнимого порядка, причем

$$|I_{i\nu}(\rho)|^2 = \frac{sh\pi\nu}{\pi\nu} \left[I_0^2(\rho) + 2\nu^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n I_n^2(\rho)}{n^2 + \nu^2} \right] = \frac{sh\pi\nu}{\pi\nu} R_{\Sigma}. \quad (11)$$

В результате ПРВ $W(x)$ находится в виде

$$W(x) = \frac{e^{\rho \cos x}}{2\pi R_{\Sigma}} \left[I_0(\rho) + 2\nu^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n I_n^2(\rho)}{n^2 + \nu^2} (\nu \cos nx - n \sin nx) I_n(\rho) \right], \quad (12)$$

где $I_n(\rho)$ – модифицированная функция Бесселя n -го порядка.

Исследована сходимость знакопеременных рядов (11) и (12). Предложена разностная схема уравнений ФПК (9).

Результаты расчетов ПРВ $W(x)$ приведены на рис.6 при $d=2$; $\varepsilon=0,8$; $\rho=1, 4, 16$; $\gamma=0$, а также на рис. 7 при $\rho=4$; $\varepsilon=0,6$; $d=-1,5$ и различных значений γ .

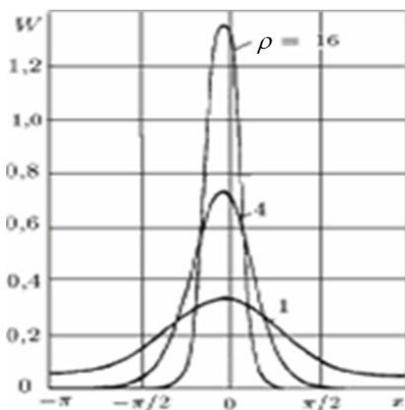


Рис. 6

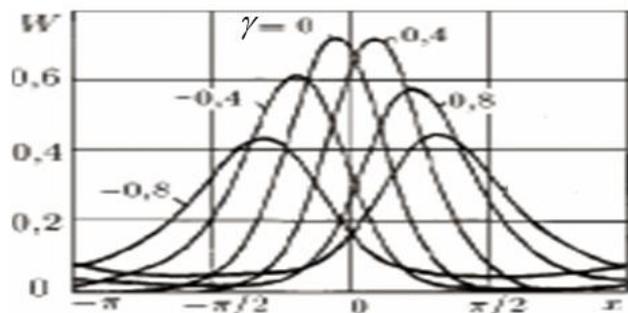


Рис. 7

Исследованы характеристики срыва слежения СС.

Предложено использовать уравнение Понтрягина в форме

$$\frac{d^2 \gamma_1(x)}{dx^2} - r q_1(x) \frac{d\gamma_1(x)}{dx} + r = 0, \quad (13)$$

где $q_1(x) = h(x) + \varepsilon \sin(x + \Delta\theta)$; $x \in [-s; s]$; $\gamma_1(x)$ – нормированное среднее время до срыва слежения. Получена разностная схемы уравнения Понтрягина (13).

Характеристики срыва слежения в форме зависимости нормированной величины γ_c среднего времени до срыва слежения от параметров СС изображены на рис. 8 при $\gamma=0,4$; $d=1,5$; рис. 9 $\gamma=0,4$; $d=-1,5$, когда

$$\gamma_c = \frac{2\pi th\pi\nu}{\bar{\gamma}} R_{\Sigma}(\rho, \nu, \varepsilon). \quad (14)$$

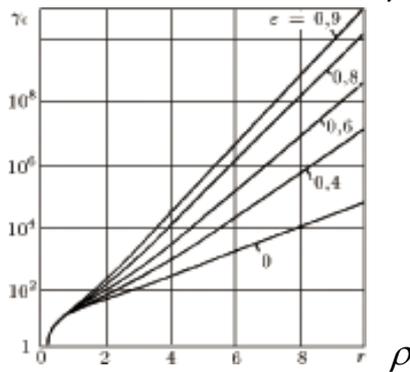


Рис. 8

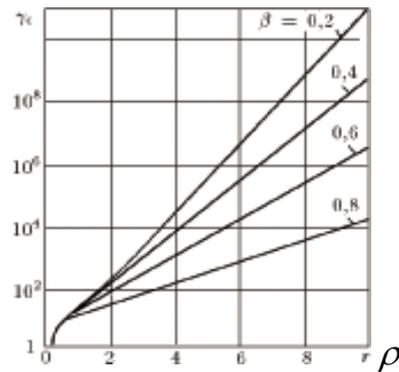


Рис. 9

Делается вывод о различных свойствах СС в зависимости от знака частотного рассогласования при $d>0$ и $d<0$, а именно: при $d>0$ увеличение ОПС ε приводит к росту (при любых ОСШ r) среднего времени до срыва слежения, при $d<0$ имеется обратная тенденция, что подтверждает соответствующий вывод, сделанный в главе 1. Таким образом, наличие мощной помехи за пределами полосы синхронизации улучшает слежение, если сигнал и помеха имеют одинаковую по знаку расстройки от частоты собственных колебаний управляемого генератора и ухудшает слежение, если значения этих расстройек противоположны.

Показано, что помеха за полосой синхронизации существенно ухудшает качество СС, снижая среднее время до срыва синхронизации на несколько порядков при одних и тех же параметрах ε , γ и r .

Для сопоставления с приведенным методом приводятся результаты вычисления ПРВ другими методами (помеха прицельная). Результаты расчета ПРВ решением уравнения ФПК получены на рис. 10 – 11 (рис. 10 при $\gamma=0$; $r=12$ и на рис. 11 при $\gamma=0,4$; $r=16$).

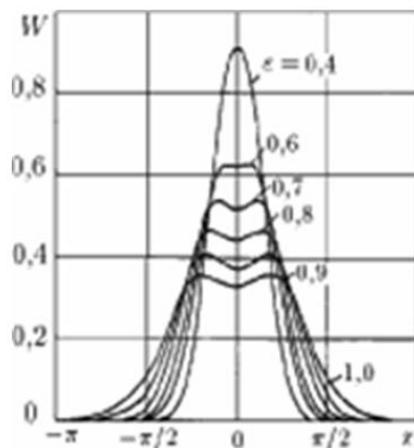


Рис. 10

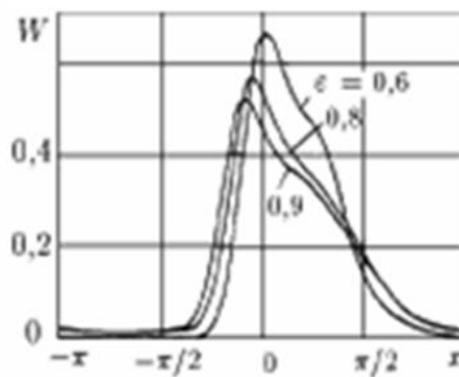


Рис. 11

В четвертой главе рассматривается статистическая динамика двухконтурной схемы Костаса; приводится вывод стохастического ДУ – модели схемы Костаса. Получены соотношения для дисперсии фазового рассогласования при комбинированном воздействии.

Получены нормированные значения дисперсии сигнала ошибки при двух сигнальных функциях: а) двоичный сигнал без возврата к нулю (NRZ), и б) при манчестерском коде.

В пятой главе разрабатывается приближенный метод анализа статистических характеристик дискретной СС (ДСС) на основе марковской модели шума (уравнение Колмогорова-Чепмена) и приближенного метода Галёркина. Получены ПРВ фазового рассогласования как при отсутствии помехи (Приложение 1), так и при наличии комбинированного воздействия (аддитивная смесь сигнала, помехи и шума). В случае ДСС первого порядка стохастическое разностное уравнение (РУ) ДСС первого порядка является частным случаем РУ (3).

Показано, что переходная ПРВ имеет вид [5]

$$q(x/z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\{-[x - z + T_0 h_1(z)]^2 / 2\sigma^2\}$$

где $h_1(z) = (1 + A_1) \sin(z) - \beta$, A_1 - амплитуда гармонической помехи.

При использовании метода Галёркина в качестве системы $\{\psi_m(x)\}$ ортонормированных функций используется система тригонометрических функций [5, 7]

$$\{\psi_m(x)\} = \{1; \sin(x); \cos(x); \sin(2x); \cos(2x); \dots\}.$$

После подстановки предполагаемого решения в уравнение Колмогорова-Чепмена получены в виде ряда ПРВ $W(x)$ сигнала рассогласования

$$W(x) \approx W_N(x) = \sum_{n=0}^N c_n(N) \psi_n(x).$$

Результаты представлены в виде графиков ПРВ $W(x)$ рис. 13 (при числе слагаемых $N=30$; $A_1=0,8$; $r=\text{var}$; $T_0=0,5$; $\gamma=0$; $d=0$).

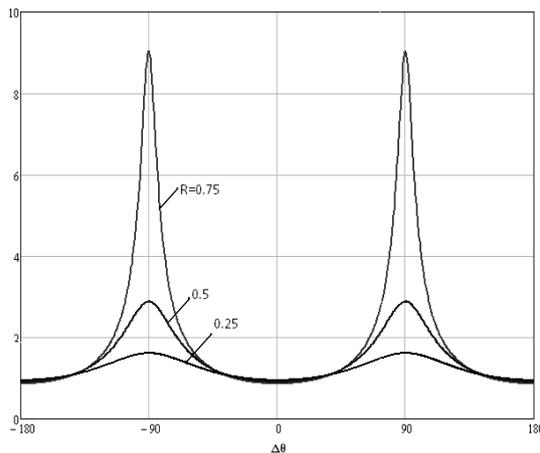


Рис. 12

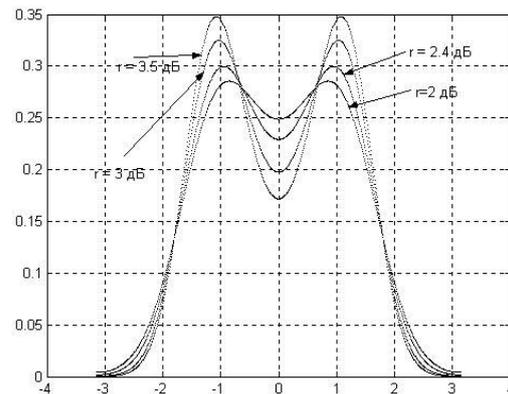


Рис. 13

Также проводится анализ статистических характеристик ДСС второго порядка. На основе марковской модели шума получены ПРВ сигнала рассогласования и исследован процесс срыва синхронизации.

Стохастическое (РУ) в данном случае является частным случаем РУ (3). Показано, что система двух РУ, характеризующих ДСС 2-го порядка приводит к зависимости нового состояния систем не только от предыдущего состояния, но

и от более раннего, то есть исходная система ДУ не описывает марковскую последовательность.

Осуществлено преобразование координат, в результате которого получена система РУ, описывающая марковскую последовательность, двумерная ПРВ которой подчиняется векторному уравнению Колмогорова-Чепмена.

Численным методом найдено решение этого уравнения [8]. Результаты вычисления ПРВ $W(x)$ фазовой ошибки представлены в виде графиков. Делается вывод о согласованности решений уравнения ФПК для непрерывной СС и для ДСС первого и второго порядков.

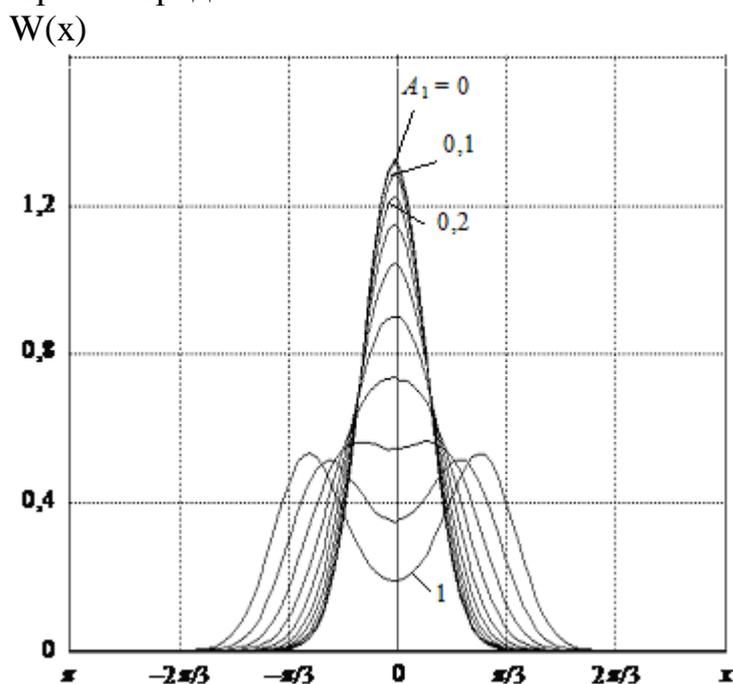


Рис. 14

В Приложении 1 [5] представлены результаты анализа ДСС 1-го порядка, полученные методом Галёркина при отсутствии гармонической помехи.

Основные результаты и выводы

1. Создана имитационная модель СС при комбинированном воздействии в виде аддитивной смеси сигнала, помехи и гауссовского шума.

2. Разработаны разностные схемы уравнений ФПК и Понтрягина, позволяющие вычислять ПРВ сигнала рассогласования в переходном режиме и находить характеристики срыва слежения при любой нелинейной характеристике фазового дискриминатора.

3. На основе приближенного метода Галёркина исследована ДСС как при отсутствии гармонической помехи, так и при наличии комбинированного воздействия на ДСС.

4. Разработаны алгоритмы и программы, позволяющие анализировать динамические и статистические характеристики непрерывных СС.

5. Показано, как в детерминированном, так и в статистическом случаях, что воздействие гармонической помехи по-разному влияет на динамику СС: подверженность СС помехе увеличивается, если частоты помехи и сигнала находятся по разные стороны от частоты покоя управляемого генератора.

6. Получены статистические характеристики (ПРВ сигнала рассогласования, среднее время до срыва слежения, среднее значение частотного рассогласования) систем синхронизации как непрерывных, так и дискретных. Рассмотрены две разновидности помех: прицельная и отстроенная по частоте.

7. Исследована двухконтурная СС (схема Костаса). Найдена дисперсия ошибки при двух формах сигнальной функции.

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. Шахтарин Б.И., Иванов А.А., Рязанова М.А. Частотная и фазовая синхронизация с коррекцией импульсной характеристики канала передачи в OFDM – системе // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2008. – №126. – С.107-117.

2. Иванов А.А., Быков А.А., Рязанова М.А.. Статистический анализ цифровых систем синхронизации // Успехи современной радиотехники. – 2008. – №2. – С. 68-76.

3. Рязанова М.А., Митин С.В.. Схема Костаса в условиях наличия активных помех и аддитивного шума // Научная сессия, посвящённая Дню радио. – 2008. – Вып. № 63. – С.457-459.

4. Рязанова М.А. Исследование схемы Костаса в условиях наличия непрерывного источника помех и аддитивного шума // Сборник научных работ лауреатов конкурса им. Е.Р. Дашковой. – 2008. – Вып. №2 . – С. 50-60.

5. Рязанова М.А. Сравнительный анализ приближенных методов для получения статистических характеристик дискретных систем синхронизации первого порядка // Сборник научных работ лауреатов конкурса им. Е.Р. Дашковой. –2008. – Вып. №2 . – С. 61-71.

6. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации / Шахтарин Б.И., Иванов А.А., Рязанова М.А. [и др.] – М.:Гелиос АРВ, 2007 – 256 с.

7. Иванов А.А., Рязанова М.А., Кровяков И.И. Анализ бесфильтровой дискретной системы фазовой автоподстройки при наличии нормального белого шума // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2007. – №117. – С. 137-148.

8. Рязанова М.А., Иванов А.А., Быков А.А.. Статистический анализ дискретной системы синхронизации 2-го порядка в условиях комбинированных воздействий // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Радиофизика и радиотехника. – 2007. – №117. – С. 160-168.

9. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: Отчет по НИР по теме СМ-2-285/МГТУ НИИ СМ; Рук. Темы Шахтарин Б.И. Исп.: Рязанова М.А. [и др.]; ГРН№ 01.200710182. – М.: 2007. – 285 с.