

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиопизики и нелинейной динамики

**Влияние аддитивного белого шума на фазовый захват системы фазовой
автоподстройки частоты**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4061 группы
направления (специальности) 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии
и системы связи

код и наименование направления (специальности)

Институт Физики

наименование факультета, института, колледжа

Пендерева Дениса Алексеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.,

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

В. В. Астахов

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Г. И. Стрелкова

инициалы, фамилия

Саратов 2025 г.

Введение

Современные радиотехнические системы (цифровая радиосвязь и радиолокация) критически зависят от синтезаторов частот (СЧ). Качество их выходного сигнала определяет характеристики всей системы, особенно на СВЧ-частотах ($>2-3$ ГГц). Основу многих СЧ составляет система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) – система автоматического регулирования, выравнивающая фазу управляемого генератора (ГУН) с фазой опорного сигнала с помощью отрицательной обратной связи (сравнение на фазовом детекторе, подстройка ГУН).

ФАПЧ применяются для частотной модуляции/демодуляции, умножения/преобразования частоты, фильтрации, генерации опорных колебаний для когерентного детектирования, локальных генераторов в приемниках/передатчиках, распределения и снижения шумов тактовых сигналов и тактирования быстрых АЦП.

Проблема заключена во влияние шумов на ФАПЧ. Работа ФАПЧ подвержена влиянию шумов и помех, ухудшающих характеристики сигнала и эффективность системы.

ФАПЧ применяются для генерации стабильных частот, модуляции/демодуляции, умножения частоты, фильтрации, распределения тактовых сигналов и тактирования АЦП. Однако их работа ухудшается под воздействием шумов: ионосферных, антенно-фидерных, внутренних (опорный генератор, фазовый детектор, петлевой фильтр, ГУН) и внешних шумов.

Ключевой помехой является Аддитивный Белый Гауссовский Шум (АБГШ) – стационарный шум с равномерной спектральной плотностью и нормальным распределением амплитуды. Помимо АБГШ в электронных системах также могут присутствовать шумы различного рода например: тепловой шум Джонсона (резисторы) и дробовой шум (движение электронов).

Основной проблемой в системах ФАПЧ является наличие фазового шума, который ухудшает отношение сигнал/шум и является критичным параметром

качества синтезатора частот. Стоит отметить также, что наличие АБГШ на входе фазового детектора влечет за собой появление фазового шума в остальных трактах системы ФАПЧ. Шум вызывает флуктуации фазы и случайные переходы, нарушая синхронизацию даже при малых расстройках. Временным эквивалентом фазового шума является джиттер, который вносит искажение в сигнал, вызывая дребезжание фазы сигнала.

Цель работы - исследование влияния белого гауссовского шума на работу системы ФАПЧ и поведение синхронизирующегося сигнала.

В задачу входит разработка программы для моделирования поведения ФАПЧ под воздействием АБГШ и анализ поведения системы ФАПЧ в зависимости от конфигурации петлевого фильтра и интенсивности АБГШ.

В разделах 1.1 и 1.2 рассматриваются аналоговая и цифровая структуры ФАПЧ, их передаточные функции. Описывается преобразование передаточных характеристик аналоговой ФАПЧ в цифровую с помощью z-преобразования. В разделах 2.1 и 2.2 был проведен анализ системы ФАПЧ. В работе были построены зависимости, осциллограммы и спектрограммы при различных параметрах петлевого фильтра.

Влияние характеристик петлевого фильтра на синхронизацию и форму выходного сигнала

Для проведения численного эксперимента в работе была использована модель цифровой системы ФАПЧ следующего вида:

Исходный сигнал $s(n)$:

$$s(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t(n) + \phi_0) \quad (1)$$

f_0 – частота исходного сигнала, ϕ_0 – начальная фаза, умножается на сигнал выхода ГУН $q(n)$:

$$q(n) = \cos(2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot t(n) + \psi(n - 1)) \quad (2)$$

где f_g частота ГУН, которая отличается от f_0 на величину df , $\psi(n - 1)$ – отсчет фазы ГУН.

Сигнал $y(n)$ – повернутый на минус 90 градусов сигнал $q(n)$, т.е:

$$y(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot t(n) + \psi(n - 1)) \quad (3)$$

Выход фазового детектора:

$$v(n) = K_d \cdot s(n) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot t(n) + p(n - 1)) \quad (4)$$

Разностное уравнение петлевого фильтра:

$$e(n) = K_p \cdot v(n) + (K_i - K_p) \cdot v(n - 1) + e(n - 1) \quad (5)$$

Разностное уравнение ГУН:

$$p(n) = K_0 \cdot e(n - 1) + p(n - 1) \quad (6)$$

Выходной сигнал с ГУНа:

$$y(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot t(n) + p(n - 1)) \quad (7)$$

Ошибка слежения:

$$r(n) = s(n) - y(n) \quad (8)$$

Исходные данные и начальные условия для моделирования брались следующие:

$K_d = 1.0$ – Коэффициент фазового детектора

$K_0 = 1.0$ – коэффициент генератора управляемого напряжением(ГУН)

$\omega_{рез} = 2 \cdot \pi \cdot X$ – резонансная частота контура(рад/с) значения $X = [100, 500]$

$\zeta = [0.2, 1]$ – демпинг фактор

$f_s = 100$ кГц – частота дискретизации

$f_0 = 1$ кГц – частота опорного сигнала

$\varphi = 0$ рад – начальная фазовая расстройка

$\delta f = 500$ Гц – начальная частотная расстройка

$f_g = 500$ Гц – частота ГУН ($f_0 - \delta f$)

$t = 2$ сек – время счета

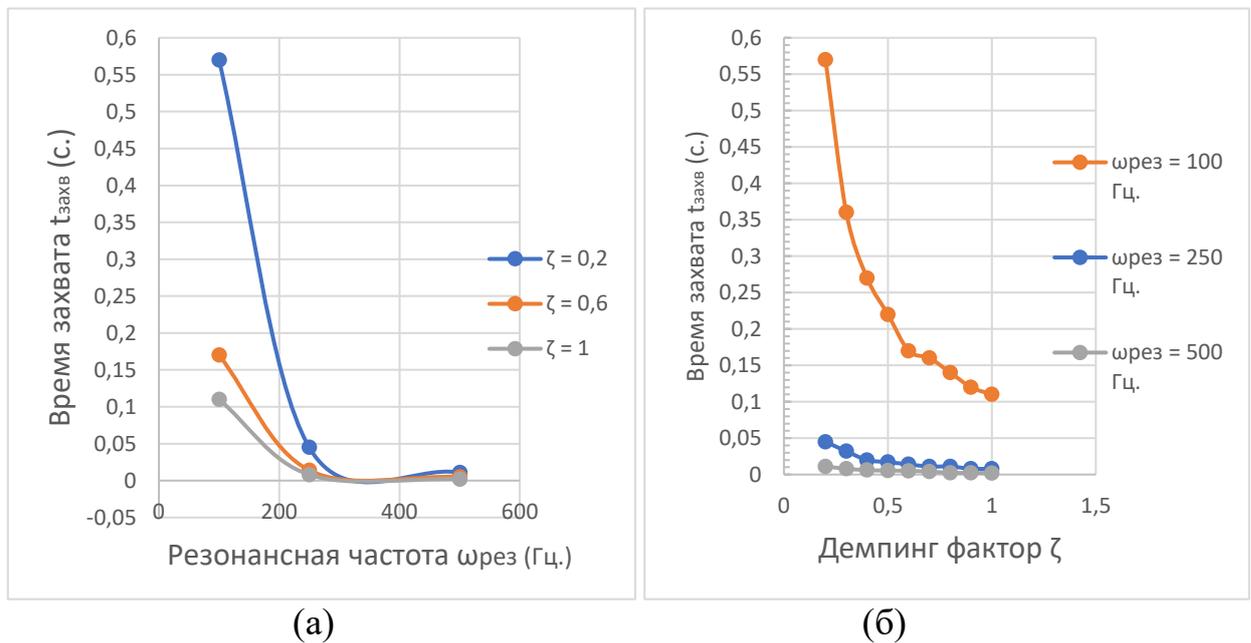


Рисунок 1. Зависимость времени захвата от демпинг фактора ζ и различной резонансной частоте $\omega_{рез}$.

Из графиков (рис. 1(а), 1(б)) видно, что с увеличением демпинг фактора и резонансной частоты время захвата уменьшается. Стоит так же отметить, что при уменьшении параметров $\zeta < 0,6$ и $\omega_0 < 250$ Гц происходит существенное увеличение времени захвата. Было выявлено, что среднеквадратичная амплитуда ошибки растет с увеличением резонансной частоты и демпинг фактора, а изменение резонансной частоты вносит больший вклад в рост ошибки слежения. Также ростом с амплитуды среднеквадратичной ошибки слежения происходит искажение сигнала с выхода ГУНа. Рост амплитуды среднеквадратичной ошибки слежения заставляет ГУН перестраивать фазу и частоту выходного сигнала, искажая его амплитуду и делая спектр сигнала многотональным.

При оценке спектров выходного сигнала с ГУНа относительно изменения характеристик петлевого фильтра было обнаружено несколько закономерностей. Было обнаружено, что с ростом параметров ζ и $\omega_{рез}$ наблюдается появление новой гармоники в спектре выходного сигнала. При

увеличении параметры ζ и $\omega_{рез}$ петлевого фильтра происходит расширение области полосы пропускания в петлевом фильтре и как следствие наблюдается рост амплитуды паразитной гармоники в спектре сигнала. Данная паразитная гармоника относится к работе фазового детектора и представляет частоту $\omega_0 + 2\omega_0$, тогда как полезный сигнал представляет собой разность фаз опорного сигнала и сигнала с выхода ГУН.

Из полученных результатов можно заключить, что основная роль в функционировании системы ФАПЧ отводится работе петлевого фильтра [19]. Изменение характеристик фильтра влияет на скорость фазового захвата сигнала и форму выходного сигнала. В случае узкой полосы пропускания и высокой добротности фильтра (низкий демпинг фактор) в системе наблюдается низкая скорость фазового захвата опорного сигнала и сохранение первоначальной формы сигнала. В противоположном случае, когда мы имеем широкую полосу пропускания и высокий демпинг фактор петлевого фильтра, в системе ФАПЧ наблюдается очень быстрый захват опорного сигнала, но наблюдается сильное искажение выходного сигнала, вызванного просачиванием паразитного сигнала с частотой равной $2\omega_0$. Таким образом, при проектировании петлевого фильтра необходимо соблюдать баланс между быстродействием системы ФАПЧ и качеством выходного сигнала [9].

Влияние аддитивного гауссова шума на поведение системы ФАПЧ

Следующим шагом численного эксперимента являлось исследование поведения системы ФАПЧ при наличии АБГШ в опорном сигнале. Для реализации данного шага исследования добавим в опорных сигнал аддитивный источник белого гауссовского шума следующим образом:

$$s(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t(n) + \phi_0) + \xi \sigma(t), \quad (9)$$

где ξ – интенсивность шума, $\sigma(t)$ – источник белого гауссовского шума. Уравнения численной модели (2–8) в данном случае остаются неизменными. При проведении численного эксперимента интенсивность аддитивного белого

шума оставалось неизменной, тогда как характеристики петлевого фильтра изменялись при двух значениях параметрах демпинг фактора $\zeta = 0,2$ и $\zeta = 0,6$, и различных частотах среза петлевого фильтра в диапазоне $100 \text{ Гц.} \leq \omega_{\text{рез}} \leq 500 \text{ Гц.}$

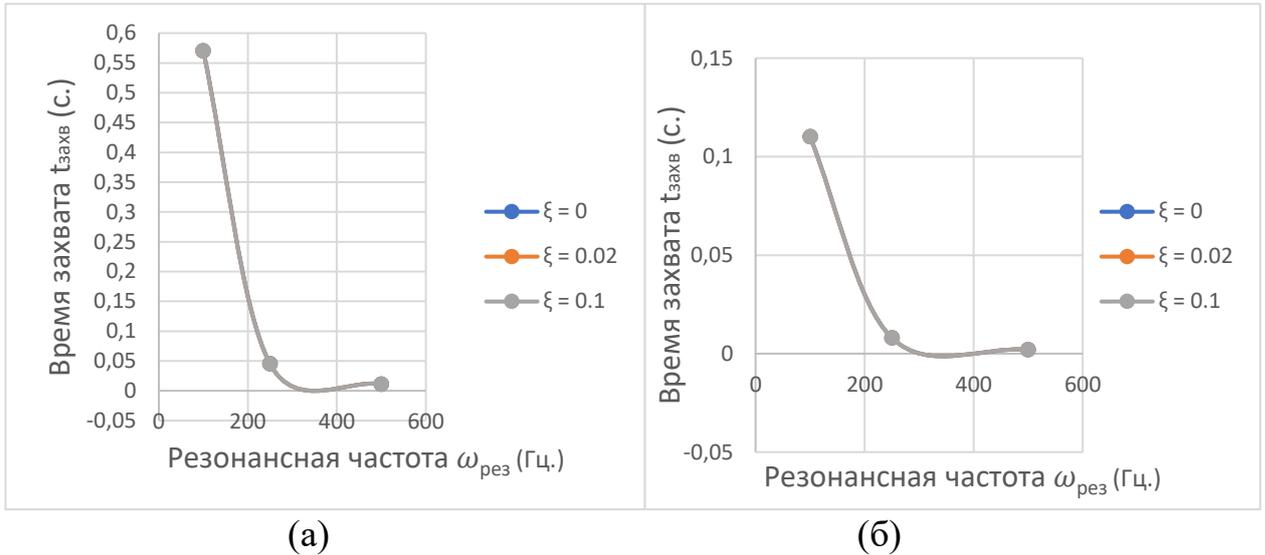


Рисунок 2. Зависимость времени захвата от $\omega_{\text{рез}}$ при демпинг факторе $\zeta = 0,2$ (а) и $\zeta = 1$ (б) и различной интенсивности шума ξ .

На рис. 2(а,б) представлены зависимости времени захвата от $\omega_{\text{рез}}$ при различных демпинг факторах $\zeta = 0,2$ и $\zeta = 1$, и различной интенсивности шума $\xi = [0 - 0,1]$ из рисунков видно, что с увеличением демпинг фактора и резонансной частоты уменьшается время захвата сигнала аналогично результатам, полученным без влияния аддитивного гауссова шума. Таким образом интенсивность аддитивного гауссова шума на захват сигнала не влияет. Однако анализ зависимости среднеквадратичной амплитуды ошибки слежения стационарного состояния сигнала показывает, что с увеличением резонансной частоты и демпинг фактора возрастает амплитуда ошибки слежения. Так же стоит отметить, что при $\omega_{\text{рез}} \leq 250 \text{ Гц}$ и интенсивности шума

$\xi > 0,02$ происходит резкое увеличение амплитуды ошибки слежения.

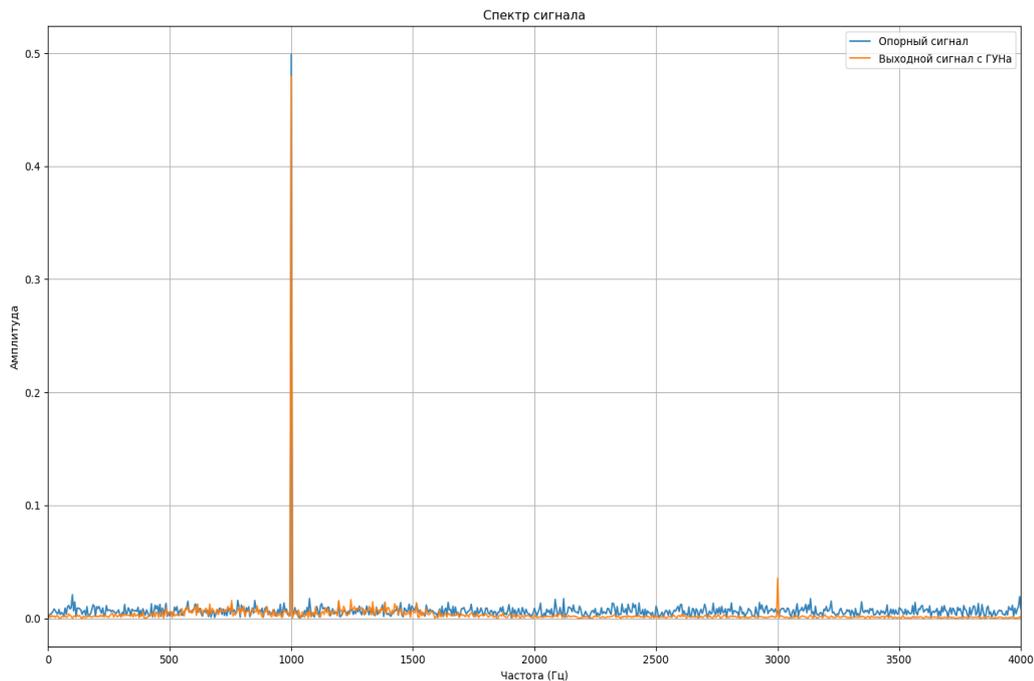


Рисунок 3. Спектр сигнала выхода ГУНа в зависимости от параметров петлевого фильтра с интенсивностью шума $\xi = 1$ (параметры фильтра $\zeta = 0,6$, $\omega_{рез} = 500$).

При рассмотрении спектров выходного сигнала в случае присутствия шума при различных характеристиках петлевого фильтра было выявлено следующее. В случае, когда демпинг фактор был равен $\zeta = 0,6$ выходной сигнал с выхода ГУНа имел отсутствие искажений в форме сигнала при $\omega_{рез} = 100$ Гц. С ростом значения $\omega_{рез} > 100$ Гц наблюдается видимое появление гармоник шума вблизи опорной частоты 1 кГц. Так при резонансной частоте $\omega_{рез} = 500$ Гц. (рис. 3) видно, что ширина данных гармоник становится больше и явно наблюдает гармоника на 3 кГц, вызванная просачиванием суммы опорного и выходного сигнала с выхода фазового детектора.

С понижением значения демпинг фактора до значения $\zeta = 0,2$ поведение выходного сигнала с выхода ГУНа существенно поменялось. В выходном сигнале отсутствуют искажения, вызванные просачиванием белого гауссова шума и присутствием суммы опорного и выходного сигнала. Однако

полученный выходной сигнал представляет собой частотно-модулированное колебание. С увеличением полосы пропускания петлевого фильтра ширина боковых гармоник спектра ЧМ сигнала становятся больше, глубина модуляции растет.

Из полученного численного эксперимента можно установить, что система ФАПЧ имеет сильную устойчивость к воздействию аддитивному белому гауссову шуму. Было установлено, что шумовое воздействие на опорный сигнал не влияет каким-либо образом на время фазового захвата сигнала. Видимые искажения выходного сигнала ГУНа наблюдались при достаточно огромной интенсивности шума $\xi = 1$. Несмотря на огромную интенсивность шума подбор характеристик петлевого фильтра позволило получить сигнал с выхода ГУНа с отсутствием видимых искажений сигнала. Как и в случае отсутствия шума, подбор характеристик петлевого фильтра играет важную роль на поведение выходного сигнала. Низкое значение демпфинг фактора вызывает появление частотно-модулированного сигнала, тогда как при увеличении демпинг фактора и частоты среза петлевого фильтра выходной сигнал может иметь сильную нелинейность и искажения, вызванные ростом шумовых гармоник вблизи частоты опорного сигнала.

Заключение

В работе проведено исследование влияния аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) на системы ФАПЧ и их выходной сигнал. Актуальность обусловлена критической ролью ФАПЧ в радиотехнических системах (радиосвязь и РЛС), где качество сигнала определяет эффективность всей системы. Показано, что внутренние шумы элементов ФАПЧ и внешние помехи, особенно АБГШ, существенно ухудшают характеристики генерируемого сигнала.

Для решения поставленных задач была разработана программа для моделирования цифровой системы ФАПЧ. Был проведен анализ поведения системы при различных конфигурациях петлевого фильтра и наличия АБГШ. Были рассмотрены аналоговая/цифровая структуры ФАПЧ, их передаточные функции.

В численном эксперименте системы ФАПЧ без шума изменялись параметры петлевого фильтра (демпинг-фактор ζ , резонансная частота $\omega_{рез}$), которые определяют скорость фазового захвата и качество сигнала. Так увеличение $\zeta > 0,6$ и $\omega_{рез} > 250$ Гц ускоряет захват, но приводит к росту среднеквадратичной ошибки слежения. Большое значение $\omega_{рез}$ влечет за собой появление паразитной гармоники на частоте $\sim 2\omega_0$, вызывающей фазовые искажения выходного сигнала ГУН. Стоит также отметить, что в случае малых значений параметров ζ и $\omega_{рез}$ происходит сохранение первоначальной формы сигнала (узкая полоса пропускания и сильная крутизна переходной области АЧХ), но влечет за собой медленный захват опорного сигнала. В противоположном случае, когда ζ и $\omega_{рез}$ имеют большие значения (широкая полоса пропускания и малая крутизна переходной области АЧХ), наблюдается быстрый захват опорного сигнала, но происходит искажение синхронизируемого сигнала. Таким образом, изменение характеристик петлевого фильтра позволяет установить необходимый

компромисс между скоростью синхронизации сигналов и качества сигнала, полученного на выходе системы ФАПЧ.

Результаты численного эксперимента системы ФАПЧ в присутствии АБГШ в опорном сигнале показали, что интенсивность шума (ξ) не влияет на время захвата и определяется параметрами петлевого фильтра ζ и $\omega_{рез}$. Было показано, что наличие шума в системе ФАПЧ существенно увеличивает среднеквадратичную ошибку слежения. При высокой интенсивности аддитивного белого шума ($\xi = 1$) наблюдались различные сценарии поведения выходного сигнала в зависимости от характеристик петлевого фильтра. При демпинг-факторе $\zeta = 0,6$ и низкой резонансной частоте ($\omega_{рез} = 100$ Гц) выходной сигнал с ГУН не имел видимых искажений. Однако с ростом $\omega_{рез}$ (> 100 Гц) в спектрограммах появлялись гармоники шума вблизи опорной частоты 1 кГц, а при $\omega_{рез} = 500$ Гц ширина этих гармоник увеличивалась, и явно проявлялась гармоника на 3 кГц, вызванная просачиванием суммарного сигнала с выхода фазового детектора. Снижение демпинг-фактора до $\zeta = 0,2$ приводило к существенному изменению поведения выходного сигнала: он оставался свободным от искажений, вызванных шумом и паразитным сигналом $2\omega_0$, но при этом представлял собой частотно-модулированное колебание. Увеличение полосы пропускания петлевого фильтра приводило к расширению боковых гармоник спектра ЧМ-сигнала и росту глубины модуляции.

В целом, численный эксперимент продемонстрировал сильную устойчивость системы ФАПЧ к воздействию аддитивного белого гауссова шума. Даже при очень высокой интенсивности шума ($\xi = 1$) грамотный подбор характеристик петлевого фильтра позволял получить сигнал с выхода ГУН без видимых искажений. Этот факт подчеркивает критическую роль петлевого фильтра в управлении шумами и формировании выходного сигнала. Низкое значение демпинг-фактора способствует появлению частотно-модулированного сигнала, тогда как увеличение демпинг-фактора и частоты среза петлевого фильтра может привести к сильной нелинейности и

искажениям выходного сигнала, вызванным ростом шумовых гармоник вблизи частоты опорного сигнала.