

На правах рукописи



Фахрутдинов Родион Ренатович

**УМЕНЬШЕНИЕ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ
СИНФАЗНО-КВАДРАТУРНОЙ СИСТЕМЕ ЛИНЕАРИЗАЦИИ
УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ПУТЕМ ИМПУЛЬСНОЙ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ КОНТУРА СЛЕЖЕНИЯ ЗА
ЗАДЕРЖКОЙ СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА**

Специальность: 2.2.13. – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата наук

Омск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Завьялов Сергей Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Радиотехнические устройства
и системы диагностики» федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Омский
государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Шакин Олег Васильевич,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, старший научный сотрудник Отделения
физики диэлектриков и полупроводников
федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Доберштейн Сергей Александрович,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник акционерного общества
«Омский научно-исследовательский институт
приборостроения»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики», г. Новосибирск

Защита состоится «29» декабря 2021г. в 14:00 часов в зале заседания диссертационного совета на заседании совета 24.2.350.01, созданного на базе Омского государственного технического университета по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» и на сайте организации www.omgtu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 644050, Омск, пр. Мира, 11, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.01.

Автореферат разослан “___” _____ 2021г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.350.01
кандидат технических наук, доцент



С.А. Завьялов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Фазовая ошибка между исходными сигналами квадратур и демодулированными сигналами, полученными с выхода линеаризуемого усилителя мощности на входах усилителя ошибки в системе с синфазно-квадратурной обратной связью (СКОС) является основным параметром, оказывающим влияние на все свойства линеаризуемого передающего тракта. Указанные свойства включают в себя устойчивость, величину петлевого усиления, и, следовательно, степень подавления продуктов искажений, а также величину вектора ошибки многопозиционного сигнала (*EVM*). Поскольку синфазно-квадратурная петля содержит в себе большое количество блоков, фазовый сдвиг, вносимый большинством из которых, является зависимым от внешних факторов, применение статических фазовращателей невозможно. Диапазон изменения фазового сдвига, вносимого единственным усилителем мощности, работающем в режиме с отсечкой тока, достигает $20 - 40^\circ$, при этом значение фазы является зависимым от амплитуды огибающей входного сигнала.

Для решения данной проблемы существует ряд способов, осуществляющих определение фазовой ошибки в течение работы системы линеаризации, и генерирующих управляющее воздействие на фазовращатель, включенный в петлю СКОС. Известные способы могут быть разделены на полностью аналоговые и способы с цифровой обработкой, которые могут использовать для вычисления фазовой ошибки прямые и косвенные данные. Аналоговые способы характеризуются низкой сложностью реализации, но при этом не позволяют получить фазовую ошибку менее $9 - 10^\circ$, кроме того, на величину фазовой ошибки значительное влияние оказывают внешние дестабилизирующие факторы, такие как: напряжение питания, температура, величины пороговых напряжений и др. Для способов с цифровой обработкой характерна меньшая величина фазовой ошибки до 5° , но для реализации данных систем необходимо применение процессорных ядер, что при разработке малогабаритного передающего тракта типа “Система на кристалле” может являться проблемой, так как, необходима разработка или приобретение сторонних процессорных ядер, что удорожает разработку и увеличивает ее длительность.

Кроме того, среди существующих на рынке решений компенсации фазовой ошибки для систем линеаризации УМ с синфазно-квадратурной обратной связью, таких как *SML*, *Motorola*, отсутствуют решения для СВ/КВ диапазона. При этом ввиду специфики метода, в частности большой чувствительностью к фазовым характеристикам, готовые решения не могут быть применены для указанного диапазона путем дополнительных преобразований частоты.

Таким образом, необходимость снижения фазовой ошибки в синфазно-квадратурной петле для эффективного подавления продуктов искажений в передающих устройствах СВ/КВ диапазона определяет актуальность диссертационных исследований.

Исследования по теме диссертации проводились в ходе выполнения НИР «Исследование возможности построения высокоскоростной сети передачи навигационных данных в СВ/КВ диапазоне для морской подвижной службы акватории северного морского пути» (Соглашение о предоставлении субсидии: № 14.574.21.0033 от 17 июня 2014 г.), проводящейся в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 — 2020 годы». Разработки выполнялись в течение 2014 – 2020 годов.

Степень проработанности проблемы. Для синфазно-квадратурных систем проблема снижения фазовой ошибки в петле была поднята в работе Petrović и Brown в 1983 году в одно время с представлением непосредственно синфазно-квадратурной системы линеаризации усилителей мощности, в работе был использован фазовый детектор на основе элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ, счетчика и цифро-аналогового преобразователя. При этом приложенная система подстройки фазы имела недостаток, заключающийся в неконтролируемом изменении фазы в петле при отсутствии сигнала, поскольку счетчик при этом не останавливался. Значительный вклад в теорию систем фазовой автоподстройки был внесен Шахгильдяном В.В., Ляховкиным А.А. (1972), Манассевичем В. (1976) и др.

В дальнейшем были предложены способы подстройки, лишенные данного недостатка, в частности Jones M.A. был предложен полностью аналоговый способ детектирования и компенсации фазовых сдвигов, значение фазовой ошибки в котором получалось в виде напряжения на выходе смесителя, на вход которого подавались модулированные сигналы со входа и с выхода УМ. Кроме того, были представлены способы с цифровой обработкой, такие как система с плавным запуском Ohishi Y., Minowa M., Fukuda E., Tanako T., осуществляющая плавное повышение петлевого усиления при одновременной ступенчатой подстройке фазы, способ с прямым фазовым детектированием при помощи АЦП, представленный Dorevitch J.E., Bozeki J.J., Galius P.H. и Rozental M. Главным недостатком таких способов является большая величина фазовой ошибки, обусловленная зависимостью от внешних дестабилизирующих факторов для аналоговой системы Jones M.A., ступенчатой подстройки Ohishi Y. и др., а также неполным охватом всей петли СКОС у Dorevitch J.E. и соавторов.

С развитием интегральных технологий было разработано большее количество систем подстройки фазы, таких как полностью аналоговые Dawson J.L., Lee T.H., основанные на применении квадратурного фазового детектора,

генерирующего напряжение, соответствующее фазовому рассогласованию. При этом, несмотря на принимаемые меры по компенсации напряжений смещений дифференциальных узлов схемы для данного способа, аналогично предыдущим, характерна большая чувствительность к напряжению питания, температуре и технологическому разбросу. Система на основе измерения тока потребления, представленная Faulkner M., оценивающая фазовый сдвиг на основе изменения тока, потребляемого усилителем мощности, требует значительной доработки ПО при внесении любых изменений в параметры передающего тракта.

В отечественной литературе проблеме снижения фазовой ошибки, как и самому методу линеаризации с применением синфазно-квадратурной обратной связи, уделено достаточно мало внимания. Среди опубликованных работ можно отметить общие теоретические работы Чешева А.М., Барского Д.Р., Гурова П.А., Нефедова В.И., Самохиной Е.В., Молодцова А.С., и др.

Таким образом, в представленных трудах, реализации систем подстройки фазы в петле синфазно-квадратурной обратной связи имеются те или иные недостатки, повышающие величину фазового рассогласования. Поэтому задача снижения значения фазовой ошибки, а также снижение ее зависимости от дестабилизирующих факторов, остается актуальной.

Целью диссертационной работы является уменьшение фазовой ошибки в интегральной синфазно-квадратурной системе линеаризации усилителей мощности, анализ влияния фазовой ошибки на устойчивость и подавление продуктов искажений, а также разработка импульсной системы автоматической подстройки фазы.

Основные задачи. Для достижения поставленной цели диссертационной работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализированы известные способы снижения фазовой ошибки в петле СКОС, исследованы их структуры и влияние внешних дестабилизирующих факторов на точность установки фазы; проведен анализ свойств УМ, оказывающих влияние на вносимые фазовые сдвиги;
2. Разработаны линейная и нелинейная модель синфазно-квадратурной обратной связи (СКОС); проведен анализ устойчивости СКОС, по результатам которого были разработаны требования к частотным свойствам частотно-зависимых блоков, входящих в состав СКОС;
3. Установлены критерии необходимой и достаточной точности компенсации фазовой ошибки в петле СКОС, а также ошибки формирования квадратур гетеродина для обеспечения максимального подавления продуктов искажений УМ;

4. Разработана поведенческая модель СКОС и нелинейного усилителя мощности в системе Matlab. Проведена верификация требований к частотным свойствам блоков, полученных в ходе анализа устойчивости и допустимой величины фазовой ошибки в петле, а также фазовой ошибки квадратур гетеродина;

5. Разработана система импульсной автоматической подстройки фазы для СКОС типа система на кристалле (СнК) на основе контура слежения за задержкой сигнала гетеродина. Разработана модель контура автоматической подстройки фазы в системе Matlab, а также модель на транзисторном уровне в технологическом процессе КМОП 180 нм. Проведен анализ устойчивости контура, определены требования к параметрам блоков, входящих в состав контура;

6. Разработана и экспериментально исследована полностью интегральная синфазно-квадратурная система линеаризации с автоматической подстройкой фазы СВ/КВ диапазона совместно с усилителями, имеющими выходную мощность 100 мВт и 100 Вт, работающих в режимах А и АВ.

Методы исследования. Аналитические исследования проводились с использованием теории радиотехнических цепей и сигналов, а также теории систем автоматического регулирования. Имитационное и поведенческое моделирование проводилось в системе Matlab, моделирование схмотехнических представлений осуществлялись при помощи методов схмотехнического моделирования Spectre системы Cadence Virtuoso. Обработка результатов и расчеты производились средствами MathCAD.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые исследовано влияние частотных свойств низкочастотных блоков, входящих в состав синфазно-квадратурной обратной связи, на эффективность подавления продуктов искажений, а также устойчивость системы. Получены аналитические выражения для построения границ устойчивости СКОС с петлевыми фильтрами до десятого порядка, при использовании табличных значений коэффициентов передаточной функции фильтров.

2. Впервые построены семейства границ устойчивости петли синфазно-квадратурной обратной связи при использовании фильтров с порядком более 2-го, имеющих аппроксимацию Баттерворта, Бесселя, Чебышева, а также с критическим затуханием; показана возможность применения фильтров с порядком более 2-го путем применения каскадного включения нескольких петлевых фильтров.

3. Предложен новый принцип автоматической подстройки фазы на основе импульсного представления сигнала фазовой ошибки, состоящий в преобразовании величины фазовой ошибки в длительность прямоугольных импульсов, формирующих компенсирующее воздействие на управляемую линию задержки.

4. Впервые показана возможность частичной компенсации искажений сигналов с аналоговой модуляцией, вызванной фазовой ошибкой формирования квадратур гетеродина посредством применения синфазно-квадратурной системы линеаризации на 10%.

5. Дополнена модель синфазно-квадратурной системы линеаризации усилителей мощности путем введения контура автоматической подстройки фазы с импульсным представлением фазовой ошибки, что позволяет производить оценку ключевых параметров системы, таких как величина петлевого усиления, эффективность подавления продуктов искажений, а также частотные свойства блоков, входящих в систему.

6. Разработана новая система автоматической подстройки фазы на основе предложенного импульсного представления фазовой ошибки, обеспечивающая снижение фазовой ошибки до 5° , которая защищена патентом на полезную модель, отличающаяся представлением величины фазовой ошибки в виде длительности импульсов, что снижает влияние внешних дестабилизирующих факторов.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью доказательств, наложенных ограничений, адекватностью моделей, применением библиотек элементов, предоставляемых ведущими полупроводниковыми фабриками; результатами имитационного и поведенческого моделирования, а также проведенными экспериментальными исследованиями.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Выработанные рекомендации по выбору параметров петлевых фильтров, таких как ширина полосы пропускания, порядок фильтра, аппроксимация, а также требования к частотным свойствам блоков, входящих в состав СКОС, позволяют получить наибольшую эффективность подавления продуктов искажений, составляющую, 20 – 30 дБ, с сохранением устойчивости системы.

2. Разработанная в системе Matlab поведенческая модель, позволяет осуществлять проектирование синфазно-квадратурной системы линеаризации на системном уровне, а также давать оценку величинам ключевых параметров

основных блоков, входящих в состав СКОС, что в 10 – 20 раз снижает количество итераций моделирования системы на транзисторном уровне, которые занимают значительное время.

3. Разработанная система автоматической подстройки фазы позволяет уменьшить трудоемкость проектирования синфазно-квадратурной петли до 40% благодаря отсутствию необходимости компенсации влияния дестабилизирующих факторов.

4. Разработана практическая реализация интегральной синфазно-квадратурной системы линеаризации УМ с импульсной автоматической подстройкой фазы для диапазона частот 0,4 – 30 МГц, позволяющая снизить уровень интермодуляционных искажений третьего порядка до 20 дБ в области, близкой к жесткому ограничению.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель СКОС с автоматической импульсной подстройкой фазы с учетом частотных, амплитудных и фазовых характеристик блоков, входящих в состав системы линеаризации и усилителя мощности.

2. Результаты исследований влияния величины фазовой ошибки в петле синфазно-квадратурной обратной связи на эффективность подавления продуктов искажений УМ.

3. Система автоматической подстройки фазы в петле синфазно-квадратурной обратной связи на основе преобразования сигналов в импульсную форму и применения контура слежения за задержкой (патент на полезную модель № 194139 U1).

Личный вклад автора. Результаты представленных исследований, полученные в ходе анализа работы систем линеаризации, теоретических исследований методов подстройки фазы и ограничений их применения, разработки методик автоматической подстройки и методик формирования и обработки сигналов получены автором лично. Практическая реализация основных результатов работы осуществлялась при непосредственном участии автора в работе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены в докладах на следующих конференциях:

- международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», Омск (2017, 2019);

- международная конференция молодых специалистов «Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах», Санкт-Петербург (2017);
- международная конференция молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным приборам, Алтай, (2020);
- всероссийская научно-техническая конференция «Россия молодая: передовые технологии - в промышленность» Омск (2017).

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 10 работах, в том числе: 4 в изданиях, включенных в перечень ВАК, 3 работы в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка условных обозначений, списка сокращений, введения, четырех глав, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 190 страниц машинописного текста, 118 рисунков, 6 таблиц, а также списка использованных источников, включающих в себя 104 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая значимость работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Анализ способов снижения фазовой ошибки в петле синфазно-квадратурной обратной связи. Исследование нелинейных свойств усилителей мощности, влияющих на величину фазовой ошибки. В разделе проведен анализ существующих методов минимизации фазовой ошибки в петле СКОС, исследованы основные особенности способов. Проведен анализ нелинейных свойств усилителей мощности, среди которых основное влияние на фазовую ошибку оказывают зависимость фазы выходного сигнала от амплитуды, а также “эффекты памяти”. По результатам анализа было установлено, что по принципу работы способы подразделяются на полностью аналоговые, в которых величина фазовой ошибки, как правило, представлена в виде напряжения, и способы с использованием цифровой обработки, где определение величины фазовой ошибки и генерирование управляющего воздействия осуществляется с использованием цифровых процессоров. При этом способы с цифровой обработкой разделяются на способы с прямой и косвенной оценкой фазовой ошибки.

В ходе анализа способов с цифровой обработкой было установлено, что при оптимальных режимах работы может быть обеспечена фазовая ошибка не превышающая 5° , при этом, главным недостатком таких способов является необходимость корректировки ПО при изменении параметров любого из блоков, входящих в состав СКОС. В цифровых способах с косвенной оценкой, таких как оценка фазовой ошибки по току потребления УМ или по возникновению неустойчивости, данный недостаток выражен сильнее. Во время работы на систему подстройки воздействуют только параметры усилителя мощности, и не учитывается влияние дестабилизирующих факторов, таких как напряжение питания, температура, а также технологический разброс параметров элементов других блоков системы СКОС. Таким образом, фазовая ошибка при использовании способов с косвенной оценкой фазовой ошибки, на практике всегда оказывается больше теоретически достижимой.

Установлено, что аналоговые способы подстройки, не требующие применения цифровых блоков в своем составе, таких как процессорное ядро, АЦП и др., позволяют реализовывать такие системы с использованием простых элементов или в интегральном исполнении без приобретения процессорных ядер, обеспечивают большее значение фазовой ошибки, составляющее $\pm 10^\circ$. При этом фазовая ошибка может быть вычислена с использованием исходного сигнала и сигнала обратной связи непосредственно, либо вычисляться путем перемножения с помощью смесителя с последующим детектированием. Основным недостатком, который присущ подавляющему большинству аналоговых способов подстройки фазы, является преобразование разности фаз в уровень постоянного напряжения. В результате, в зависимости от используемого фазового детектора неизбежно возникает ошибка установления детектированного напряжения, вызванная изменениями пороговых напряжений, температуры, технологическим разбросом, и другими дестабилизирующими факторами, вследствие чего ошибка установления фазы возрастает.

В ходе анализа нелинейных свойств усилителей мощности было исследовано три основных типа вносимых нелинейных искажений: амплитудные, выражающиеся в отклонении амплитудной характеристики от линейной; фазовые, как зависимость фазы выходного сигнала от амплитуды огибающей. А также, так называемые “эффекты памяти”, состоящие в зависимости текущего значения амплитуды и фазы сигнала от предыдущего.

Было показано, что при работе усилителя мощности в режимах с отсечкой тока диапазон изменения фазы выходного сигнала может достигать значения 40° , что обусловлено варакторным эффектом мощного активного элемента, а также конечной скоростью теплоотведения, что при работе УМ в режимах с высокими

скоростями передачи данных вызывает возникновение эффектов памяти. Указанные эффекты изменения характеристик УМ необходимо учитывать при разработке системы линеаризации и определении значений коэффициентов передачи блоков, входящих в ее состав.

По результатам проведенного анализа был сделан вывод: поскольку на работу СКОС оказывают влияние негативные дестабилизирующие факторы, для определения количественных значений петлевого усиления, а, следовательно, эффективности подавления продуктов искажений, а также оценки требуемой точности компенсации фазовой ошибки должно быть проведено исследование влияния фазовой ошибки между исходными и демодулированными сигналами на основные параметры СКОС, и проведен анализ ее устойчивости.

Глава 2. Исследование влияния величины фазовой ошибки на основные параметры синфазно-квадратурной обратной связи. Раздел посвящен анализу устойчивости синфазно-квадратурной обратной связи, а также исследованию влияния фазовых ошибок на эффективность подавления продуктов искажений. Для определения максимальных достижимых значений петлевого усиления в СКОС и достижения максимального подавления продуктов нелинейных искажений должен быть проведен анализ ее устойчивости. При этом с целью снижения сложности аналитических выражений целесообразно на первом этапе использовать линейную модель усилителя мощности со статическим значением фазового сдвига.

В отличие от обратных связей, работающих только на низких частотах, синфазно-квадратурная обратная связь содержит большое количество блоков, включая смесители, обеспечивающие преобразование частоты. Кроме того, ввиду наличия фазовых искажений усилителя мощности (УМ), СКОС имеет большее число ограничений для обеспечения устойчивой работы системы.

Для проведения анализа устойчивости линейной модели были сделаны следующие допущения:

1. В диапазоне рабочих амплитуд смесители будут представлять собой линейные устройства с определенным коэффициентом передачи, который не зависит от частоты.

2. Считая блоки преобразования частоты и сумматоры линейными устройствами, а также сдвиг фазы между квадратурами равным 90° , параллельные каналы на частоте модулирующего сигнала будут объединены в один тракт, работающий с комплексным сигналом $s(t)$:

$$s(t) = I(t) + jQ(t); \quad (1)$$

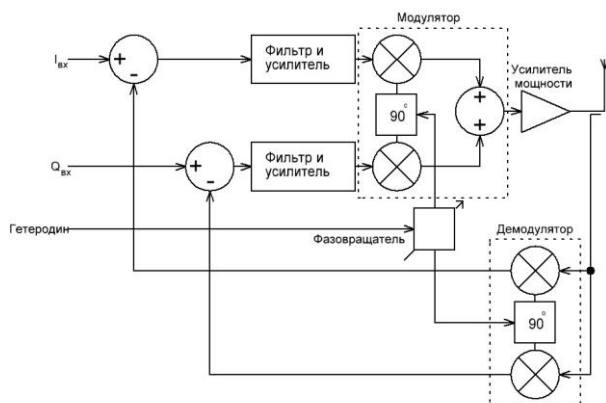
где $I(t)$ и $Q(t)$ модулирующие сигналы квадратур.

3. Ввиду большой электрической длины тракта общая вносимая петлевая задержка будет описываться как звено чистого запаздывания.

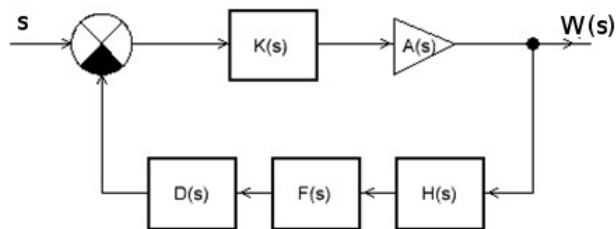
4. Считая усилитель мощности линейным устройством, блоки преобразования частоты линейными и независимыми от частоты, а уровень сигнала гетеродина неизменным, операция преобразования частоты будет исключена из общей структуры.

5. Поскольку усилитель мощности работает со сравнительно узкополосным сигналом, имеющим ширину спектра равной ширине спектра модулирующего сигнала, для структуры без преобразования частоты, усилитель мощности также можно считать частотно-независимым.

С учетом принятых допущений структурная схема СКОС была преобразована к линейной функциональной схеме петли без преобразования частоты, схемы представлены на рисунке 1. Полученная функциональная схема содержит идеальный сумматор, блок, описывающий передаточную функцию прямого канала до усилителя мощности $K(s)$, усилитель мощности с передаточной функцией $A(s)$, блок, описывающий передаточную функцию аттенюаторов и масштабирующих усилителей канала обратной связи $H(s)$, блок петлевого фильтра $F(s)$, а также блок, описывающий задержку прохождения сигнала $D(s)$.



а)



б)

Рисунок 1 – Структурная схема СКОС (а) и линейная функциональная схема (б), составленная с учетом принятых допущений.

В результате преобразований и принятых допущений была получена передаточная функция для синфазно-квадратурной обратной связи (СКОС):

$$W(s) = \frac{\frac{k_{ПР}}{1 + \tau_y s} \cdot g \cdot e^{-\sigma}}{1 + \frac{k_{ПР}}{1 + \tau_y s} \cdot g \cdot e^{-\sigma} \cdot K_{OC} \cdot F(s) \cdot e^{-\varphi}}. \quad (2)$$

где $k_{ПР}$ – коэффициент передачи прямого тракта, K_{OC} – коэффициент передачи тракта обратной связи, g – коэффициент передачи усилителя мощности, τ_y – постоянная времени усилителя ошибки в секундах, φ – фазовый сдвиг в

контуре ОС в радианах, σ – величина фазовых искажений усилителя мощности, в радианах, $F(s)$ – передаточная функция петлевого фильтра.

Для определения границ устойчивости для фильтров с произвольным порядком были получены следующие уравнения:

$$-tg(\varepsilon) - K_1\omega + tg(\varepsilon)K_2\omega^2 + K_3\omega^3 + \dots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} K_n\omega^n + (-1)^{\frac{m}{2}} tg(\varepsilon)K_m\omega^m = 0 \quad (3)$$

$$G_{MAX} = \frac{\left[1 - K_2\omega^2 + \dots + (-1)^{\frac{m}{2}} K_m\omega^m\right]^2 + \left[\omega K_1 + \dots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} K_n\omega^n\right]^2}{\sqrt{\left[1 - K_2\omega^2 + \dots + (-1)^{\frac{m}{2}} K_m\omega^m\right]^2 + \left[\omega K_1 + \dots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} K_n\omega^n\right]^2}}, \quad (4)$$

где $G_{MAX} = k_{np}k_{OCg}$ – максимальное значение петлевого усиления, n – нечетные коэффициенты, m – четные коэффициенты, $\varepsilon = \varphi + \sigma$ – полное значение фазового сдвига в контуре, равное сумме сдвига, вносимого УМ σ , и фазовой ошибки φ , K_n и K_m – коэффициенты полинома, определяемые из таблицы 1.

В представленной таблице $a_1 \dots a_3$ и $b_1 \dots b_3$ – ненормированные коэффициенты полиномов звеньев фильтров, приведенные в справочниках для фильтров, а $J1 \dots J4$ – вторичные коэффициенты третьего порядка, которые определяются из табличных значений для фильтра третьего порядка.

Таблица 1 – Значения коэффициентов полиномов произвольной аппроксимации передаточной функции

К \ n	1	2	3	4	5
$K1$	$a_1 + \tau_y$	$a_1 + \tau_y$	$a_1 + a_2 + \tau_y$	$a_1 + a_2 + \tau_y$	$a_3 + J1$
$K2$	$a_1 \tau_y$	$b_1 + a_1 \tau_y$	$b_2 + a_2(a_1 + \tau_y) + a_1 \tau_y$	$b_2 + a_2(a_1 + \tau_y) + a_1 \tau_y + b_1$	$b_3 + J1 \cdot a_3 + J2$
$K3$	-	$b_1 \tau_y$	$b_2(a_1 + \tau_y) + a_1 a_2 \tau_y$	$b_2(a_1 + \tau_y) + a_2(b_1 + \tau_y a_1) + \tau_y b_1$	$J1 \cdot b_3 + J2 \cdot a_3 + J3$
$K4$	-	-	$a_1 b_2 \tau_y$	$a_2 b_1 \tau_y + b_2(b_1 + \tau_y a_1)$	$J2 \cdot b_3 + J3 \cdot a_3 + J4$
$K5$	-	-	-	$b_1 b_2 \tau_y$	$J3 \cdot b_3 + J4 \cdot a_3$
$K6$	-	-	-	-	$J4 \cdot b_3$

В результате были получены границы устойчивости при использовании фильтров с порядком от 1го до 4го, (рисунок 2), а также при разной частоте среза петлевого фильтра (рисунок 3).

Полученные результаты показывают значительное снижение максимального петлевого усиления G_{MAX} при увеличении порядка фильтра в $n^4 - n^5$ раз где n – порядок фильтра, при этом четко прослеживается зависимость коэффициента петлевого усиления G_{MAX} от крутизны перехода характеристики фильтра от полосы пропускания к полосе задерживания. Исходя из этого, можно сделать вывод, что системы, имеющие фильтр с критическим затуханием будут иметь лучшие показатели устойчивости в сравнении с системами, имеющими фильтры, в порядке ухудшения, на 2 – 4 дБ каждый: фильтр Бесселя, Баттерворта,

Чебышева. Причем, для последнего характерно снижение максимального усиления системы при больших амплитудах пульсации в полосе пропускания или задерживания, что связано с большим поворотом фазы.

Полученная зависимость максимального петлевого усиления от частоты среза петлевого фильтра 1-го порядка показывает, что, работая с узкополосными сигналами, может быть достигнуто большее петлевое усиление, а, следовательно, большая эффективность линеаризации, в частности увеличение ширины полосы пропускания в 10 раз требует снижения петлевого усиления на 20 дБ. Данный эффект обусловлен невозможностью обеспечить фазовую ошибку менее 5° в широкой полосе частот.

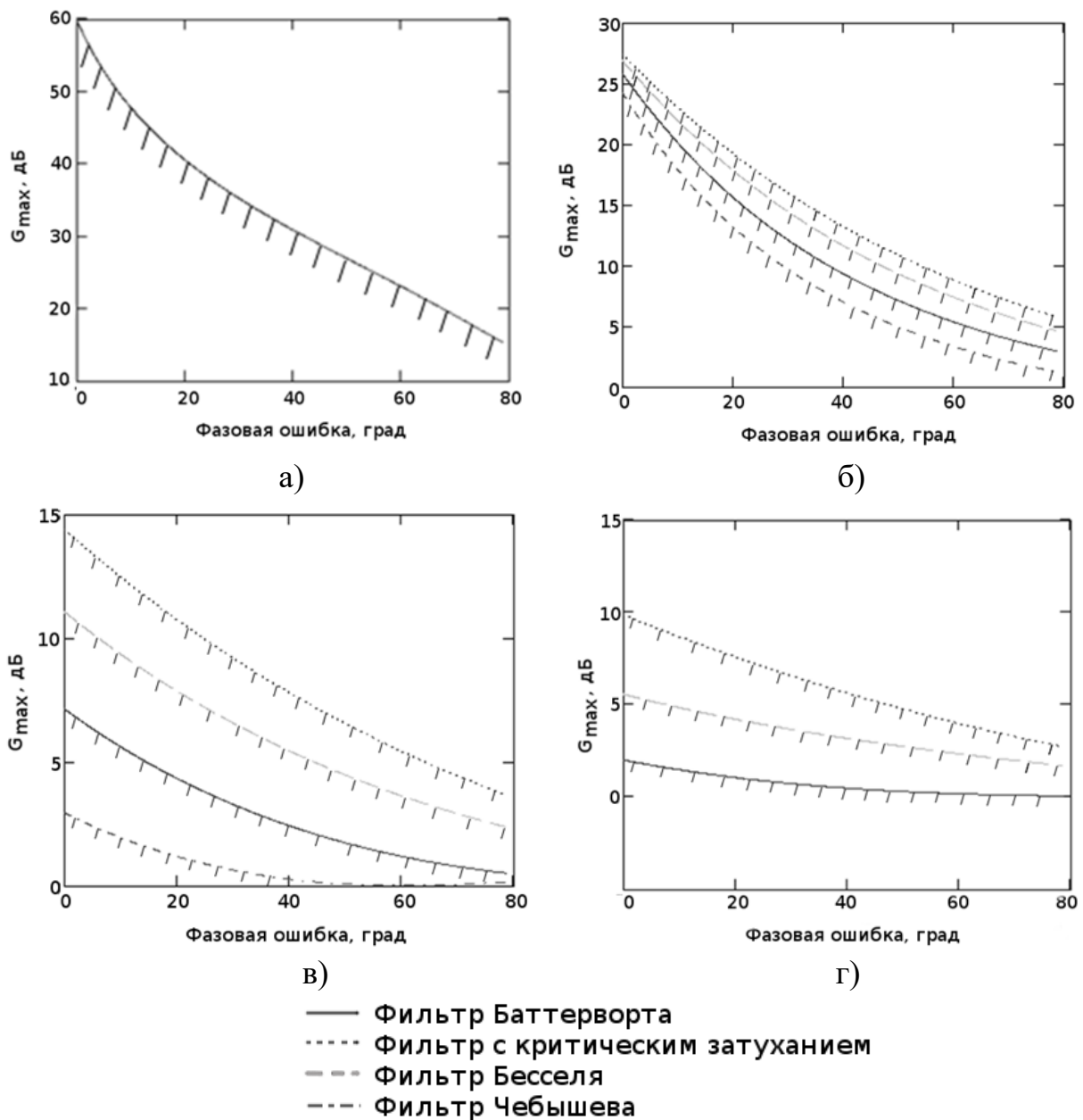


Рисунок 2 – Границы устойчивости в зависимости от петлевого усиления и фазовой ошибки в петле. Для фильтров: а) первого порядка; б) второго порядка; в) третьего порядка; г) четвертого порядка

При помощи критерия Попова для нелинейных систем, с применением полиномиальной модели УМ было показано, что граница устойчивости, полученная с линейной моделью, описывающей максимальное значение коэффициента передачи во всем диапазоне амплитуд, может быть использована для определения характеристик блоков, входящих в состав СКОС, поскольку границы устойчивости, полученные с использованием линейной и нелинейной модели совпадают.

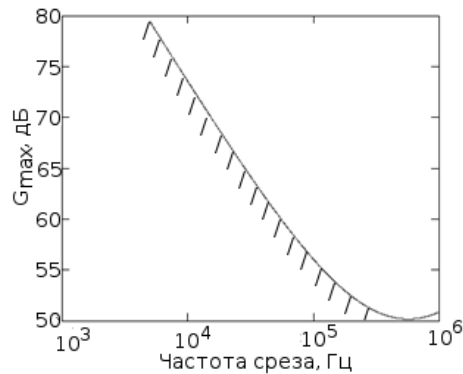


Рисунок 3 – Граница устойчивости в зависимости от петлевого усиления и частоты среза для фильтра 1го порядка

Построены годографы систем на границе устойчивости, которые представлены на рисунке 4, где $W_{KH}(j\omega)$ соответствует линейной модели и критерию устойчивости Найквиста, а $W_{KP}^*(j\omega)$ – нелинейной по критерию Попова.

Таким образом, было показано, что для определения границ устойчивости СКОС с нелинейным усилителем мощности может быть использована линейная модель системы, что позволяет при проектировании использовать полученные выражения (3) и (4), где величина G_{MAX} не должна превышать максимальный уровень петлевого усиления во всем диапазоне амплитуд нелинейного тракта.

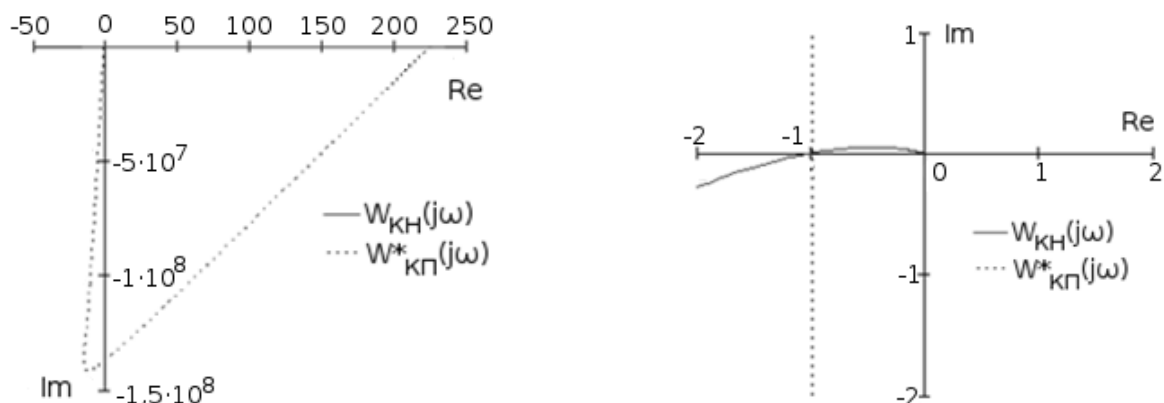


Рисунок 4 – Годограф систем на границе устойчивости

Было установлено, что, для получения наибольшей эффективности подавления продуктов искажений целесообразно применять петлевой фильтр первого порядка, дополняя систему, при необходимости лучшей фильтрации

демодулированных сигналов, дополнительным фильтром высокого порядка с частотой среза, большей, чем у петлевого фильтра.

В ходе анализа влияния фазовой ошибки в петле на эффективность подавления продуктов искажений было установлено, что эффективность работы СКОС снижается с увеличением значения фазовой ошибки:

$$s(t) = \frac{d(t)}{1 + k_{\text{лп}} \cdot K_{\text{ос}} \cdot g \cdot \cos(\varphi)}. \quad (5)$$

где $d(t)$ – амплитуда внесенных усилителем мощности продуктов нелинейных искажений.

Анализ влияния фазовой ошибки гетеродина показал, что, так как фазовая ошибка квадратур гетеродина приводит к изменению базиса векторов, с которыми работают низкочастотные каналы обратной связи, указанная ошибка не приводит к ухудшению линеаризации усилителя мощности, но изменения базиса векторов приводит к искажению сигнального созвездия при многопозиционной модуляции.

Из анализа влияния фазовых ошибок было установлено, что для эффективной работы СКОС необходимо обеспечить фазовую ошибку в петле не более 5° , и для квадратур гетеродина не более $0,6^\circ$. При этом, с целью максимальной компенсации ошибок формирования квадратур гетеродина, целесообразно располагать модулятор структурно как можно ближе к входу линеаризуемого усилителя мощности, при этом динамический диапазон модулирующих смесителей должен составлять 50 – 60 дБ.

Для проведения поведенческого моделирования синфазно-квадратурной системы линеаризации с автоматической подстройкой фазы в петле была разработана модель в системе Matlab, использующаяся в качестве нелинейного усилителя модель Салеха, учитывающая амплитудные и фазовые искажения. Проведенное моделирование СКОС показало, что устойчивость системы СКОС в основном определяется блоком, имеющим самую низкую частоту среза, т.е. петлевым фильтром, увеличение порядка которого приводит к необходимости снижения коэффициента петлевого усиления в n^5 раз, где n – порядок фильтра. Максимальное петлевое усиление, равное 56 дБ, было достигнуто при использовании петлевого фильтра 1-го порядка с полосой пропускания ниже 25 кГц, таким образом, результаты проведенного моделирования подтвердили выводы, сделанные при аналитических исследованиях системы.

На основании проведенного анализа, требований к величине фазовой ошибки не более 5° , а также специфики существующих способов ее компенсации была выдвинута гипотеза, что для устранения влияния на величину фазовой ошибки внешних воздействий через уровни постоянного напряжения целесообразно перейти от амплитудного к широтно-импульсному представлению величины фазовой ошибки без применения сложной цифровой обработки сигнала.

Глава 3. Разработка системы импульсной автоматической подстройки фазы в петле синфазно-квадратурной обратной связи.

Исходя из результатов анализа способов снижения фазовой ошибки, проведенного в главе 1, а также согласно выдвинутой гипотезе, значительное снижение влияния дестабилизирующих факторов на детектирование фазовой ошибки может быть достигнуто путем перехода к широтно-импульсному представлению величины фазовой ошибки, т.е. информация о величине разности фаз будет содержаться в ширине импульсов. При этом генерирование управляющего воздействия необходимо производить путем интегрирования импульсного сигнала, содержащего информацию о фазовой ошибке. Таким образом, на основе требований к величине фазовой ошибки не более 5° , система подстройки фазы должна представлять собой астатическую систему первого порядка, для минимизации статической ошибки установления фазы, с преобразованием разности фаз исходного и демодулированного сигналов в ширину импульса.

Для реализации системы с указанными свойствами в структуру СКОС был введен контур слежения за задержкой и импульсным временным дискриминатором на входе, применяя в качестве входных воздействий усиленные и ограниченные исходный и демодулированный сигналы одной из квадратур. При этом на выходе дискриминатора может быть получен сигнал фазовой ошибки в виде длительности импульса, равной временной разнице между фронтами исходного и демодулированного сигналов.

Структура СКОС с разработанной системой подстройки фазы в петле, защищенной патентом, представлена на рисунке 5.

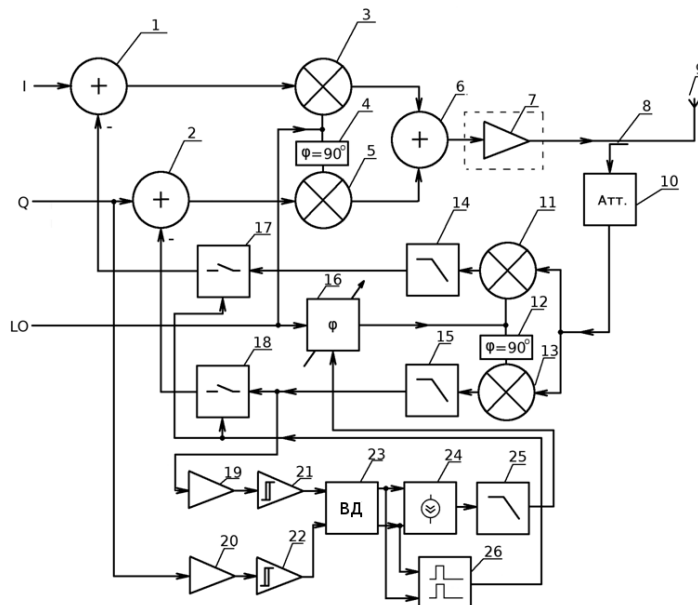


Рисунок 5 – СКОС с разработанной системой автоматической подстройки фазы

На рисунке 5 I и Q – модулирующие сигналы в квадратурной форме, LO – сигнала гетеродина. Детектирование фазовой ошибки в разработанной системе осуществляется временным дискриминатором 23, при этом дискриминатор работает с исходным и демодулированным сигналом одной из квадратур. Для преобразования сигналов в импульсную форму используются усилители ограничители 19, 20 и компараторы с гистерезисом 21, 22. В результате временной дискриминатор формирует управляющее воздействие на схему накачки заряда 24, которая на петлевом фильтре 25 формирует управляющее напряжение для регулируемой линии задержки 16. Чтобы система была устойчива в процессе первичного установления, петля СКОС размыкается посредством аналоговых ключей 17 и 18. При установлении разности фаз между исходной и демодулированной квадратурой Q равной нулю временной интервал между импульсными сигналами, формируемыми усилителями ограничителями и компараторами, также будет равен нулю, в результате формирование управляющих импульсов на выходе временного дискриминатора будет прекращено. В отсутствии управляющих импульсов на выходе временного дискриминатора, а, следовательно, на входах схемы накачки заряда источники тока будут отключены от выхода схемы накачки заряда, при этом управляющее напряжение на выходе петлевого фильтра будет поддерживаться емкостями, входящими в его состав.

Контур слежения за задержкой представляет собой астатическую систему с первым порядком астатизма, т.е. фильтр, подключенный к схеме накачки заряда, представляет собой интегратор. Для описания передаточной функции контура было использовано выражение, соответствующее системе с интегратором:

$$K(s) = \frac{k_d K_{ЛЗ}}{s C_\phi}, \quad (6)$$

где C_ϕ – емкость фильтр интегратора, k_d – коэффициент передачи временного дискриминатора, $K_{ЛЗ}$ – крутизна характеристики линии задержки.

При помощи z-преобразования было получено выражение для определения оптимального значения коэффициента петлевого усиления:

$$K = 1 - e^{\frac{1}{1+n} \ln(P_0)}, \quad (7)$$

где P_0 – величина установившегося временного сдвига, и, соответственно, фазы в процентах от периода сигнала, n – количество циклов работы контура.

Таким образом, подставив типичные значения крутизны КМОП линий задержки с ограничением тока СВ/КВ диапазона, было установлено, что для обеспечения минимальной ошибки по скорости целесообразно увеличивать коэффициент передачи разомкнутой системы. Вместе с тем, поскольку на временной сдвиг демодулированного сигнала воздействие осуществляется с

преобразованием частоты, крутизна управления будет зависеть от частоты гетеродина. Из проведенного анализа установлено, что для работы в широком диапазоне передающих частот необходимо предусмотреть регулировку крутизны регулирования линии задержки либо коэффициента передачи временного дискриминатора.

С целью оценки эффективности снижения фазовой ошибки с помощью предложенной системы автоматической подстройки фазы была разработана поведенческая модель в системе Matlab, содержащая в своем составе усилитель мощности на основе модели Салеха, которая позволяет учитывать фазовые искажения. Структура разработанной модели приведена на рисунке 6. Полученные результаты моделирования фазовой ошибки представлены на рисунке 7.

В результате моделирования установлено, что значение фазовой ошибки при работе системы, составляет не более $\pm 5^\circ$, что меньше ошибки при использовании аналоговых способов в 2 раза. При этом в зависимости от вносимых усилителем мощности фазовых искажений, достигнута величина петлевого усиления 45 – 53,4 дБ, что позволило получить величину подавления интермодуляционных продуктов третьего порядка, равной 20 – 30 дБ.

На основе полученных значений величины подавления интермодуляционных продуктов третьего порядка был проведен сравнительный анализ эффективности подавления продуктов нелинейных искажений системы СКОС с предложенной системой подстройки фазы с другими известными методами линеаризации усилителей мощности.

В ходе анализа методов линеаризации было установлено, что в настоящее время существует достаточно большое количество методов повышения линейности. Среди известных методов наибольшую эффективность имеют методы цифровых предискажений с адаптивными алгоритмами, позволяющие, аналогично системе СКОС, добиться подавления интермодуляционных продуктов на 20 – 30 дБ.

Установлено, что адаптивные НЧ предискажения, несомненно, являются одним из перспективных методов, которые позволяют достичь высокой линейности передающего такта с любыми типами усилителей мощности. Но для работы адаптивных цифровых систем требуются производительные сигнальные процессоры, что не является существенной проблемой при проектировании передатчиков высокой мощности.

При проектировании маломощных малогабаритных устройств, типа система на кристалле, применение цифровой обработки в выходном тракте не всегда целесообразно, поскольку реализация такого устройства требует внедрения

процессорного ядра в систему. Учитывая специфику проектирования СнК устройств цифровое ядро должно быть разработано, что требует затрат дополнительных ресурсов и времени. Альтернативным решением может стать приобретение процессорного ядра, как IP блока, у сторонних разработчиков, но это тоже приведет к затратам ресурсов.

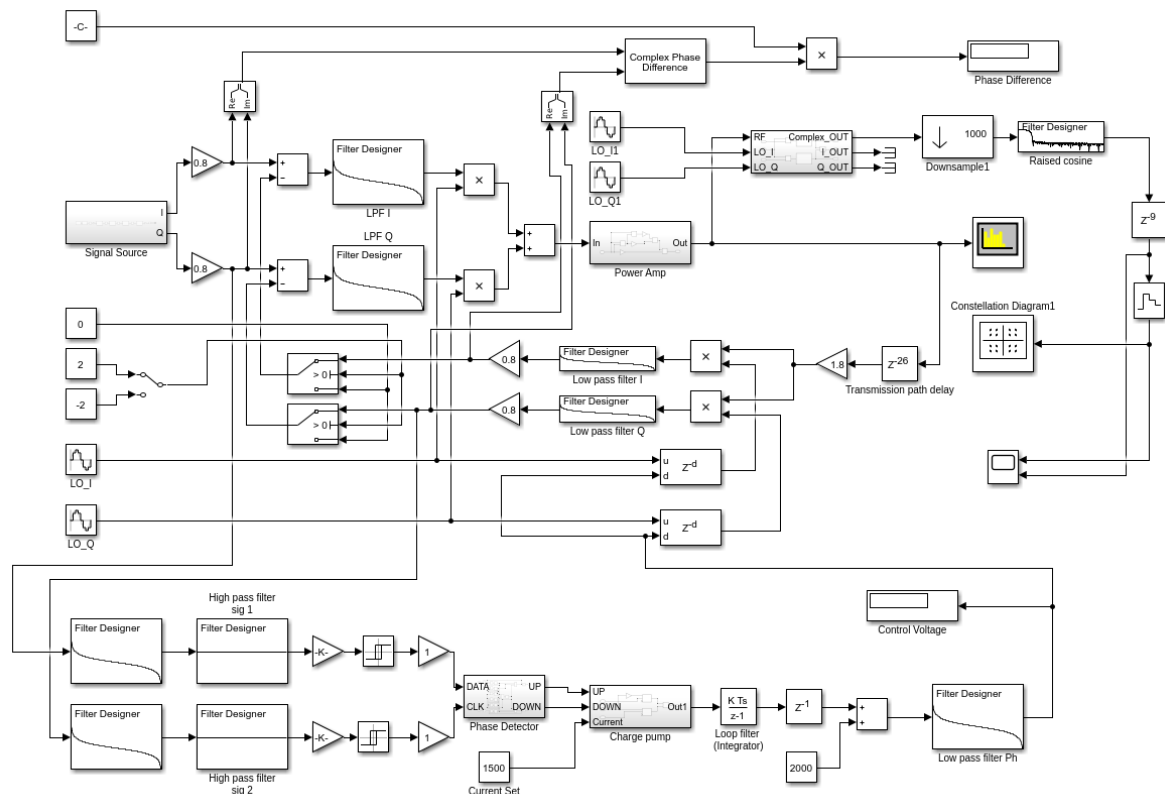


Рисунок 6 – Разработанная модель СКОС с автоматической подстройкой фазы

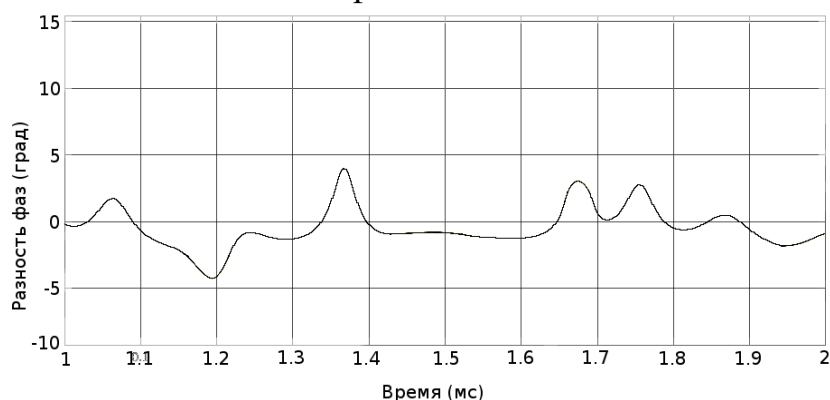


Рисунок 7 - Зависимость разности фаз от времени

Таким образом, в ходе проведенного сравнительного анализа методов линеаризации установлено, что для малогабаритных СнК устройств оптимальным решением будет применение синфазно-квадратурной обратной связи. При этом применение разработанной импульсной системы подстройки фазы позволяет

добиться сопоставимой эффективности подавления продуктов искажений 20 – 30 дБ.

Ввиду невозможности подключения к внутренним цепям системы в интегральном исполнении, с целью определения эффективности работы разработанной СКОС был проведен дополнительный анализ возможности ее косвенной оценки. Дополнительный анализ литературных источников показал, что для корректной оценки эффективности работы СКОС в части подавления продуктов нелинейных искажений при помощи разработанной системы для многопозиционных сигналов целесообразно использовать параметры величины вектора ошибки *EVM* (*error vector magnitude*) и коэффициент ошибок модуляции *MER* (*Modulation error ratio*).

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (I_H - I_Y)^2 + \sum_{n=1}^N (Q_H - Q_Y)^2}{\sum_{n=1}^N (I_H^2 + Q_H^2)}}, \quad (8)$$

где I_H и Q_H – квадратуры исходного сигнала, I_Y и Q_Y – квадратуры искаженного услителем сигнала.

$$MER(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{сигн}}{P_{ош}} \right), \quad (9)$$

где $P_{сигн}$ – среднеквадратичная мощность вектора сигнала, а $P_{ош}$ – среднеквадратичная мощность вектора ошибки.

Кроме того, на основе дополнительного анализа, а также специфики проведения измерений полностью интегральных систем, сделан вывод, что при проведении экспериментальных исследований в качестве критериев эффективности работы системы линейаризации СВ/КВ диапазона с разработанной интегральной системой подстройки фазы, помимо значений *EVM* и *MER*, следует использовать процентные значения отклонения амплитудной характеристики от линейной, максимальный уровень установленного петлевого усиления, при котором система сохраняет устойчивость.

Глава 4. Практическая реализация полностью интегральной синфазно-квадратурной системы линейаризации усилителя мощности с автоматической подстройкой фазы в петле. Глава содержит схемотехническое описание и топологическую реализацию разработанной интегральной СКОС с автоматической подстройкой фазы, а также результаты измерений передающего тракта с системой линейаризации усилителя мощности.

В ходе анализа существующих технологических процессов и их свойств было установлено, что для реализации системы СКОС СВ/КВ диапазона

целесообразно использовать технологический процесс КМОП 180 нм, поскольку данный процесс имеет оптимальное соотношение быстродействия и стоимости, кроме того, анализ современного состояния микроэлектронной промышленности показал, что технологические процессы с большей размерностью в настоящее время получают все меньшее распространение при проектировании СБИС типа «Система на кристалле» (СнК).

В выбранном технологическом процессе была разработана система СКОС типа СнК. Схема разработанной СКОС содержит активные смесители, построенные по схеме ячейки Гилберта, сигнал гетеродина на которые подается в синусоидальной форме, что позволяет снизить количество паразитных составляющих в спектре сигнала на выходе смесителей, в результате могут применяться фильтры первого порядка, повышая устойчивость системы. Блоки вычитателей и усилители ошибки представляют собой один блок, построенный на малошумящем усилителе с четырьмя входами, использование которого снижает чувствительность к технологическому разбросу, а также к разбалансировке плеч дифференциальных каскадов, что обеспечивается общими обратными связями исходного и демодулированного дифференциальных сигналов.

Для изготовленных экспериментальных образцов СКОС был разработан и изготовлен испытательный стенд, фотография которого представлена на рисунке 8.

Для макетного усилителя мощности были произведены измерения зависимости полезного сигнала и интермодуляционных продуктов 3го порядка при работе с сигналом КАМ16, с символьной скоростью 2,5 кбод/с, результаты которых приведены на рисунке 9.

По результатам измерений было установлено, что уровень интермодуляционных искажений третьего порядка (ИМ3) нелинеаризованного усилителя при малых мощностях составляет минус 60 дБ и увеличивается с ростом мощности, достигая уровня минус 24 дБ при максимальной мощности. Введение СКОС позволяет получить уровень интермодуляционных продуктов минус 60 дБ до мощности полезного сигнала 17 дБм. После этой точки наблюдается резкий рост искажений. При максимальной выходной мощности уровень искажений составляет минус 40 дБ. Так при разомкнутой петле точка компрессии 1 дБ соответствовала выходной мощности 17 дБм (50 мВт), а при замыкании петли СКОС точка компрессии 1 дБ соответствует уровню 19,5 дБм (89,1 мВт). Таким образом, введение линеаризации позволяет получить больший в 1,78 раз (4,5 дБ) уровень неискаженной мощности, при том что, уровень максимальной искаженной мощности в обоих случаях остался неизменным, и составил 100 мВт (20 дБм).

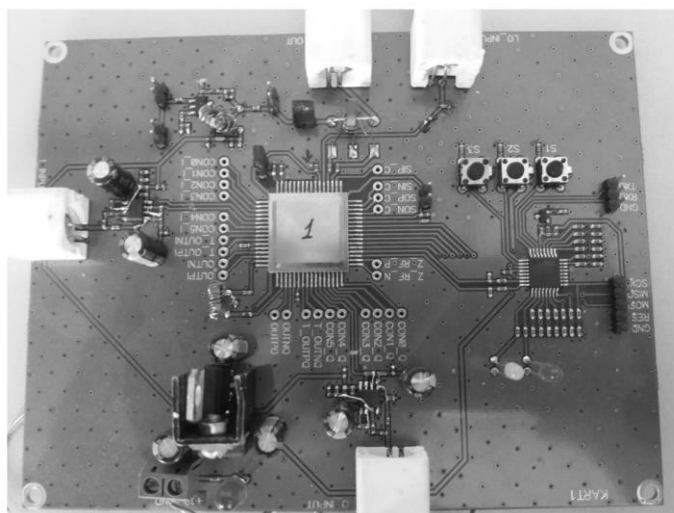


Рисунок 8 –Испытательный стенд для разработанной интегральной СКОС типа СнК

Экспериментальные исследования разработанной СКОС с усилителями мощностью 100 Вт, имеющими разный ток покоя, показали что, АХ усилителя с большим током покоя без линеаризации имеет отклонение от линейной характеристики 24% в области средних мощностей (51,6 Вт), а также достигает максимального значения 40% при приближении мощности к максимальному значению (127 Вт измеренное значение). Усилитель с меньшим током покоя без линеаризации имеет отклонение от линейной характеристики до 100%, фактически представляя переход от квадратичной зависимости к зависимости вида квадратного корня. Применение СКОС позволяет значительно снизить максимальное отклонение, так при мощности 10,9 Вт (40,4 дБм) наблюдается отклонение, не превышающее 16,5%, при этом данное отклонение, со знаком минус достигается при мощности 65 Вт (48,1 дБм).

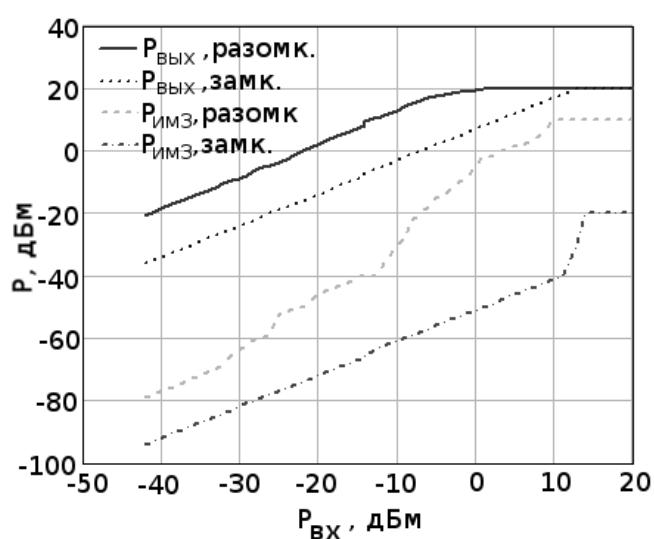


Рисунок 9 – Зависимость уровня полезного сигнала и интермодуляционных продуктов при работе с модуляцией КАМ16

Для усилителя с большим током покоя до достижения мощности 100 Вт коэффициент усиления нелинеаризованного УМ составляет 3,4 – 5,2 раза (11,07 – 14,13 дБ), после введения СКОС коэффициент усиления составил 3,4 – 3,6 раз (11,07 – 11,12 дБ). При приближении к области ограничения коэффициент усиления снижается. Разброс коэффициента усиления с меньшим током покоя, без применения линеаризации составил 100 – 6683 раз (40 – 76 дБ), линеаризация усилителя позволила достичь разброса 4000 – 5825 (73 – 76 дБ) в области до достижения жесткого ограничения, таким образом, применение СКОС с автоматической подстройкой фазы позволяет уменьшить разброс коэффициента усиления с 98% до 31,3%.

Измеренные значения параметров *EVM* и *MER*, а также уровень интермодуляционных продуктов при средней мощности, близкой к максимальной, для исследованных типов усилителей при работе с модуляцией КАМ16 с символьной скоростью 2,5 кбод/с при частоте несущей 1,5 МГц сведены в таблицу 2. Применение модуляции КАМ16 обусловлено, главным образом, большой наглядностью сигнального созвездия на выходе усилителя мощности.

Также было показано, что в области малых мощностей, для усилителей, работающих с низким током покоя, подавление интермодуляций может достигать 40 дБ.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики эффекта линеаризации исследуемых усилителей

Усилитель	<i>MER</i> , дБ			<i>EVM</i> , дБ			Уровень ИМЗ, дБ		
	без линеар.	с линеар.	Δ	без линеар.	с линеар.	Δ	без линеар.	с линеар.	Δ
Макетный, 100 мВт (однотактный)	18,0	27,0	9,0	-17,9	-26,5	8,6	-30	-55	25
100 Вт, ток покоя 0,5А (двухтактный)	17,7	27,0	9,7	-17,8	-28,1	10,3	-36	-56	20
100 Вт, ток покоя 0,25 А (двухтактный)	14,5	29,1	14,6	-14,4	-28,8	14,4	-20	-55	35

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате исследований известных способов снижения фазовой ошибки в петле синфазно-квадратурной обратной связи, было установлено, что известные системы снижения фазовой ошибки в петле СКОС имеют те или иные недостатки, приводящие к ограниченному применению синфазно-квадратурной системы на практике. Так, аналоговые способы имеют большую ошибку установки фазы (9 – 10°) и высокую зависимость от внешних дестабилизирующих факторов, в то время как системы с цифровой обработкой, хотя и могут

обеспечить меньшее значение ошибки, в оптимальных условиях (до 5°), требуют корректировки ПО при изменении параметров тракта, а также требуют применения процессорных ядер, что может являться недостатком для носимых малогабаритных устройств.

2. Проведен анализ устойчивости синфазно-квадратурной обратной связи, с использованием линейной и нелинейной моделей усилителей мощности, учитывающих внесение усилителем фазовых искажений. Показано, что для определения границы устойчивости может быть использована линейная модель, имеющая усиление, равное максимальному значению усиления нелинейного усилителя мощности, во всем диапазоне амплитуд.

3. Показано, что наибольший коэффициент петлевого усиления, а, следовательно, и величина подавления продуктов искажений, может быть достигнута при использовании петлевого фильтра первого порядка с минимальной частотой среза, необходимой для работы с модулирующим сигналом, имеющим требуемую ширину спектра. Из чего следует, что для трактов, работающих с узкополосным сигналом, может быть достигнуто большее подавление искажений, чем для широкополосных сигналов. При увеличении частоты среза фильтра первого порядка в 10 раз снижение величины петлевого усиления, а, следовательно, величины подавления искажений составляет 20 дБ.

4. Установлено, что для устойчивой и эффективной работы синфазно-квадратурной обратной связи необходимо, чтобы фазовая ошибка между исходными и демодулированными сигналами не превышала 5° , а фазовая ошибка формирования квадратур гетеродина не превышала $0,6^\circ$.

5. Разработана система автоматической подстройки фазы в петле с импульсным представлением фазовой ошибки в петле, позволяющая получить ошибку установления фазы, не превышающую 5° , что в два раза меньше ошибки установления фазы с использованием аналоговых методов. Снижение величины ошибки установки фазы достигнуто путем снижения влияния внешних дестабилизирующих факторов и технологического разброса до 2 – 3%, которые, для случая представления сигнала ошибки в виде уровня постоянной составляющей, в совокупности приводят к отклонению сигнала ошибки до 30%, что обусловлено импульсным представлением сигнала ошибки, а также астатизмом системы первого порядка.

6. Разработано схемотехническое представление и топологическое описание полностью интегральной системы линеаризации типа СнК в технологическом процессе 180 нм КМОП, для работы в СВ/КВ диапазонах длин волн.

7. По результатам проведенных экспериментальных исследований разработанной интегральной синфазно-квадратурной обратной связи с автоматической подстройкой фазы в петле было установлено:

- введение синфазно-квадратурной обратной связи с минимизацией фазовой ошибки и максимизацией петлевого усиления за счет применения разработанной системы импульсной автоматической подстройки фазы, а также применение петлевого фильтра первого позволяет добиться снижения интермодуляционных искажений порядка на 20 дБ в области близкой к ограничению;

- в области малых мощностей, для усилителей, работающих с низким током покоя, подавление интермодуляций может достигать 35 – 40 дБ;

- для усилителей с малыми искажениями в начале АХ, для диапазона до номинальной мощности может быть получено отклонение от линейности не более 10%, при этом снижение тока покоя приводит к необходимости снижения петлевого усиления, а, следовательно, увеличению отклонения до 16,5 – 20%.

- несмотря на вышеописанное ограничение, введение СКОС позволяет повысить КПД усилителя мощности на 2 – 3% путем снижения тока покоя до 50%, компенсируя значительное снижение коэффициента усиления в начальной области амплитудной характеристики;

- введение СКОС при равных значениях интермодуляционных искажений позволяет повысить среднюю выходную мощность на 2 – 3 дБ;

- применение СКОС в передающих системах с УМ, имеющих малый ток покоя, позволяет снизить разброс коэффициента усиления на 66,7% в области амплитудной характеристики до достижения области жесткого ограничения.

- СКОС не позволяет увеличить максимальную мощность искаженного сигнала, так как не влияет на положение точки перехода к перенапряженному режиму активного элемента, и, соответственно, жесткому ограничению.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что введение в классическую синфазно-квадратурную обратную связь разработанной системы автоматической подстройки фазы позволяет реализовать потенциал подавления внеполосного излучения на 20 – 30 дБ и снижения ошибок модуляции на 9 – 15% при помощи СКОС. Дальнейшее развитие тематики по созданию линеаризующего устройства типа система на кристалле должно состоять в уточнении и дополнении схемотехнических решений СФ блоков в части увеличения динамического диапазона и улучшения согласования блоков по постоянному току.

Выполненные исследования позволили предложить новые научно обоснованные технические решения в виде интегральной системы линеаризации усилителей мощности с импульсным представлением фазовой ошибки без применения сложной цифровой обработки, что имеет существенное значение

развития теории и практики линеаризации малогабаритных носимых радиопередающих устройств и позволяет уменьшить уровень внеполосного излучения, а также ошибок модуляции.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно провести анализ возможности автоматического определения крутизны регулирования управляемой линии задержки в контуре подстройки фазы с целью выбора оптимальных параметров работы системы автоматической подстройки фазы в широкой полосе частот модулирующего сигнала.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления основных научных результатов кандидатской диссертации

1. **Фахрутдинов Р.Р.**, Завьялов С.А., Косых А.В., Мурасов К.В. Анализ способов подстройки фазы в декартовых системах обратной связи усилителей мощности // Омский научный вестник. – 2016. – № 6(150). – С. 142-146.

2. **Фахрутдинов Р.Р.**, Завьялов С.А. Моделирование влияния фазовой ошибки квадратур гетеродина на подавление интермодуляционных продуктов в синфазно-квадратурной петле // Омский научный вестник. – 2017. - № 4(154). – С. 99-102.

3. **Фахрутдинов Р.Р.** Способ автоматической подстройки фазы в синфазно-квадратурной системе линеаризации усилителей.// Вестник СибГУТИ. – 2020. - №2. – С. 3-12.

4. **Фахрутдинов Р.Р.** Анализ устойчивости синфазно-квадратурной петли обратной связи для линеаризации усилителей мощности. // Вестник СибГУТИ. – 2020. – №3. –С. 79-89.

Патенты:

5. Патент № 194139 U1 МПК H04L 27/00, H04L 27/34. Система автоматической подстройки фазы в петле синфазно-квадратурной обратной связи / **Фахрутдинов Р.Р.**, Завьялов С.А., Мурасов К.В., Ляшук А.Н. – Оpubл. 28.11.2019. - Заяв. № 2019129302 от 18.09.2019. Бюл. №34. ил.

Другие публикации:

6. Косых А.В., Завьялов С.А., **Фахрутдинов Р.Р.**, Мурасов К.В., Вольф Р.А. Влияние точности формирования квадратур гетеродина на спектр сигнала в передающих трактах с синфазно-квадратурной петлей // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т.5. - №4. – С. 276-282.

7. **Фахрутдинов Р.Р.**, Завьялов С.А. Аналоговый генератор квадратур гетеродина для интегральной синфазно-квадратурной петли СВ-КВ диапазона в техпроцессе 180 нм. // Россия молодая: передовые технологии - в промышленность!. – 2017. - №1. – С. 290-297.

8. Kosykh A.V., Zavyalov S.A. **Fakhrutdinov R.R.**, Murasov K.V., Wolf R.A. Influence of LO quadrature formation accuracy on signal spectrum in Cartesian loop transmission paths // 11th international IEEE scientific and technical conference “Dynamics of system, mechanism and machines, Dynamics 2017. – 2017. – P. 1-4.
9. **Фахрутдинов Р.Р.**, Завьялов С.А. Способ формирования квадратур гетеродина синусоидальной формы для интегральной синфазно-квадратурной петли // Wave Electronics And Its Applications In The Information And Telecommunication Systems. – 2017. – С. 138-143.
10. **Fakhrutdinov R.R.**, Murasov K.V. Zavyalov S.A. The Specialized Integrated Operational Amplifier with Four Inputs for Reducing of Error Signal Offset Voltage in Integrated Cartesian Loop in process 180 nm // 13th International IEEE Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2019: Conference proceedings. – 2019. – P. 8944699-1- 8944699-6.
11. **Fakhrutdinov R.R.**, Zavyalov S.A., Murasov K.V., Lyashuk A.N. Integrated Cartesian Feedback with Automatic Phase Adjustment and Power Amplifier// 21st International Conference On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices EDM 2020. – 2020. – P. 104-111.
12. **Фахрутдинов Р.Р.** Интегральная синфазно-квадратурная система линеаризации усилителей мощности с импульсной автоматической подстройкой фазы // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции (6–8 октября 2021 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2021. – С. 111-113.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 26.10.21 г. Формат 60х84/16.

Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 1,63.

Тираж 100 экз. Заказ 161.

Типография: 644050, Омск-50, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08.

Омский государственный технический университет,
отдел научной информации