РОМАНОВ
Станислав Константинович

кандидат технических наук, заместитель начальника НТЦ ОАО «Концерн «Созвездие», автор более 100 научных работ в области моделирования устройств синтеза частот и формирования сигналов

ТИХОМИРОВ
Николай Михайлович

доктор технических наук, начальник НТЦ ОАО «Концерн «Созвездие», автор более 80 научных работ в области теории и проектирования устройств синтеза частот и формирования сигналов

ЛЕНЬШИН
Андрей Валентинович

доктор технических наук, профессор кафедры Военного авиационного инженерного университета (г. Воронеж), автор более 100 научных работ в области теории и проектирования устройств синтеза частот и формирования сигналов

С.К. РОМАНОВ
Н.М. ТИХОМИРОВ
А.В. ЛЕНЬШИН

СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В УСТРОЙСТВАХ СИНТЕЗА И СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ

С.К. РОМАНОВ, Н.М. ТИХОМИРОВ, А.В. ЛЕНЬШИН

СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В УСТРОЙСТВАХ СИНТЕЗА И СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ

«РАДИО и СВЯЗЬ»

С.К. РОМАНОВ
Н.М. ТИХОМИРОВ
А.В. ЛЕНЬШИН

СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В УСТРОЙСТВАХ СИНТЕЗА И СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ

МОСКВА
«РАДИО и СВЯЗЬ»
2010

УДК 621.376.3
ББК 32
Р69

Рецензенты:
доктор техн. наук, проф. Н.Н. Удалов
доктор техн. наук, проф. Б.И. Шахтарин

Р69 **Романов С.К., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В.** Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот. – М.: Радио и связь, 2010. – 328 с.: ил.

Изложены основные понятия и особенности реализации устройств синтеза и стабилизации частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ). Значительное внимание уделено методам построения синтезаторов (СЧ), их расчету, проектированию, а также вопросам практического применения в радиосистемах связи. Даны готовые формулы для инженерных расчетов параметров СЧ и приведены примеры построения отдельных узлов синтезаторов.

Для инженеров, занимающихся разработкой СЧ с повышенными требованиями к их качеству, аспирантов и научных работников.

Издательство «Радио и связь»
www.radiosv.ru

IBSN 978-5-89776-013-8 © «Радио и связь», 2010
© С.К. Романов, Н.М. Тихомиров,
А.В. Леньшин, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Указатель аббревиатур и обозначений **7**
Предисловие **16**
Введение **23**
Глава первая. **Тенденции применения импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот телекоммуникационных систем** **29**
1.1. Принципы построения, технические характеристики, классификация устройств синтеза и стабилизации частот 29
1.2. Критический анализ основных режимов работы систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты управляемых генераторов..... 39
1.3. Современные направления развития методов импульсно-фазовой автоподстройки для устройств синтеза и стабилизации частот приемопередающей аппаратуры телекоммуникационных систем новых поколений 42
1.4. Пути исследования показателей качества импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными параметрами 50
Глава вторая. **Исследование динамических характеристик систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными структурой и параметрами** **53**
2.1. Исследование переходных процессов в системе импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными структурой и параметрами 53
2.1.1. Функциональная схема системы импульсно-фазовой автоподстройки с дробным делением частоты с переменными структурой и параметрами 54
2.1.2. Особенности переходных процессов в системе импульсно-фазовой автоподстройки с дробным делением частоты с использованием переменных структуры и параметров 58
2.2. Определение быстродействия в системе импульсно-фазовой автоподстройки частоты третьего порядка при реализации способов ускорения переходных процессов 62
2.3. Постановка и решение задачи по определению момента изменения структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки в течение переходного процесса 68
2.4. Оценка выигрыша по времени переходных процессов перестройки частоты от изменения структуры и параметров колец импульсно-фазовой автоподстройки 76
Глава третья. **Исследование динамических характеристик систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными структурой и параметрами** **80**

3.1. Пространства состояний линейной системы фазовой автоподстройки частоты 80
3.2. Методика определения быстродействия синтезаторов частот с коммутацией токо накачки и постоянных времени ФНЧ 99
3.3. Быстродействие синтезаторов частотс переключаемыми источниками тока частотно-фазового детектора 115
3.4. Быстродействие синтезаторов частот с системой ИФАПЧ и коммутируемым ФНЧ 128
3.5. Применение методов линеаризации системы ИФАПЧ и коммутации элементов ФНЧ для повышения быстродействия синтезаторов частот 143
Глава четвертая. **Исследование чистоты спектра систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными структурой и параметрами** **157**
4.1. Исследование чистоты спектра выходного сигнала системы импульсно-фазовой автоподстройки с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты 157
4.2. Определение помех дробности в синтезаторах частот с коммутацией структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки с дробными делителями частоты 158
4.3. Математическая модель кольца с дельта-сигма модулятором в дробном делителе частоты и частотно-фазовым детектором с неидентичными токами зарядовой накачки 165
4.4. Помехи в синтезаторах частот с дробными делителями, управляемыми дельта-сигма модуляторами 176
4.5. Использование подхода к определению уровней помех дробности на основе представления дельта-сигма модулятора в виде устройства, генерирующего «цветной» шум 191
4.6. Интермодуляционные помехи в системе ИФАПЧ с дробными делителями частоты 198
Глава пятая. **Обоснование путей улучшения чистоты спектра и модуляционных характеристик систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты** **206**
5.1. Исследование путей компенсации помех дробности в системах импульсно-фазовой автоподстройки с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты 206
5.1.1. Структурная схема системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты с разными вариантами построения схем компенсации помех дробности 206
5.1.2. Компенсация помех дробности в кольце автоподстройки с импульсно-фазовым детектором типа «выборка-запоминание» с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты 209
5.1.3. Непрерывная модель кольца автоподстройки с импульсно-

фазовым детектором типа «выборка-запоминание» под воздействием модулирующей дельта-сигма последовательности 213
5.1.4. Исследование колец автоподстройки с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты и частотно-фазовыми детекторами при неравных токах зарядовой накачки 214
5.2. Использование синтезаторов с коммутацией структуры и параметров колец автоподстройки частоты для формирования сигналов с частотно-фазовой модуляцией 218
5.2.1. Метод широкополосной частотно-фазовой модуляции в синтезаторах с коммутацией структуры и параметров колец автоподстройки с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты 218
5.2.2. Блок-схема синтезаторов частот с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты и дополнительными цепями модуляции .. 221
5.3. Искажения при частотно-фазовой модуляции в синтезаторах с коммутацией структуры и параметров колец автоподстройки с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты 224
5.3.1. Линейная модель кольца автоподстройки с частотно-фазовой модуляцией выходного сигнала с помощью дельта-сигма модуляторов в дробных делителях частоты 224
5.3.2. Исследование линейной модели кольца автоподстройки с дельта-сигма модуляторами в дробных делителях частоты под воздействием модулирующих сигналов 229
5.3.3. Нелинейная модель кольца импульсно-фазовой автоподстройки с частотно-фазовой модуляцией выходного сигнала с помощью дельта-сигма модуляторов 231
5.3.4. Результаты исследования уровней помех в нелинейной модели кольца импульсно-фазовой автоподстройки при модуляции с помощью дельта-сигма модуляторов 234
Глава шестая. **Инженерные методы проектирования синтезаторов частот с коммутацией структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты** **237**
6.1. Методы расчета параметров синтезаторов с коммутацией структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты 237
6.1.1. Концепция выбора полосы эффективного регулирования при коммутации структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки 237
6.1.2. Выбор схемы, способа технической реализации параметров корректирующего фильтра при коммутации структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки синтезаторов частот 240
6.1.3. Влияние выбора полосы пропускания на динамические параметры и чистоту спектра синтезаторов с коммутацией структуры

и параметров кольца автоподстройки с дробным делением частоты 242
6.2. Метод параметрического синтеза синтезатора с коммутацией структуры и параметров для ускорения переходного процесса в кольце импульсно-фазовой автоподстройки частоты 244
6.2.1. Методика проектирования синтезаторов частот с коммутацией структуры и параметров двух зарядовых накачек в кольце импульсно-фазовой автоподстройкой частоты 247
6.2.2. Пример параметрического синтеза синтезаторов с коммутацией структуры и параметров кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты 250
Глава седьмая. **Проектирование и экспериментальное исследование синтезаторов частотообразующих устройств широкополосной приемо-передающей аппаратуры телекоммуникационных систем** **256**
7.1. Порядок проектирования синтезаторов частот с коммутацией структуры и параметров в зависимости от их функционального назначения в широкополосной приемо-передающей аппаратуре телекоммуникационных систем 256
7.1.1. Основные задачи разработки прототипов систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными структурой и параметрами для устройств синтеза частот приемо-передающей аппаратуры телекоммуникационных систем 257
7.2. Практическая реализация и экспериментальные исследования образцов синтезаторов частот с коммутацией структуры и параметров колец импульсно-фазовой автоподстройки 265
7.2.1. Примеры практической реализации и результаты экспериментальных исследований ряда возбудителей-синтезаторов частот и гетеродинных синтезаторов частот для приёмо-передающей аппаратуры 265
7.2.2. Метрологическое обеспечение измерений динамических параметров, чистоты спектра и модуляционных характеристик опытных образцов синтезаторов 277
7.2.3. Оценка преимущества по динамическим параметрам и чистоте спектра синтезаторов с коммутацией перед синтезаторами без коммутации структуры и параметров колец автоподстройки 279
Приложение 1. **Программы расчета динамических параметров и чистоты спектра СЧ-ИФАПЧ** **288**
Приложение 2. **Компьютерная модель системы ИФАПЧ с коммутируемыми во времени токами зарядовой накачки и постоянными времени ФНЧ для исследования способов ускорения переходных процессов** **308**
Список литературы **315**

УКАЗАТЕЛЬ АББРЕВИАТУР И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВС	– аналоговый вычислительный СЧ
АРМ	– автоматизированный радиомониторинг
АФХ	– амплитудно-фазовая характеристика
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЧМХ	– амплитудно-частотная модуляционная характеристика
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БГИС	– большая гибридная ИС
БЗ	– способ ускорения ПП – «быстрый захват»
БИС	– большая ИС
ВСЧ	– возбудительный СЧ
ГИ	– генератор импульсов
ГСЧ	– гетеродинный СЧ
ГУН	– генератор, управляемый напряжением
Д	– дискретизатор по времени с дискретным белым шумом
ДЗН	– способ ускорения переходных процессов с двумя ЗН
ДОЧ	– датчик опорных частот
ДДПКД	– делитель с дробно-переменным коэффициентом деления
ДПКД	– делитель частоты с переменным коэффициентом деления
ДСМ	– дельта-сигма модулятор (модуляция)
ДФКД	– делитель с фиксированным коэффициентом деления
ЗН	– зарядовая накачка
И	– интегратор
ИЗН	– интегральная зарядовая накачка ЗН
ИМС	– источник модулирующего сигнала
ИС	– интегральная схема
ИФАПЧ	– импульсно-фазовая автоподстройка частоты
ИФАПЧК	– ИФАПЧ с коммутацией структуры и параметров
ИФД	– импульсно-фазовый детектор
ИФД/ВЗ	– ИФД типа «выборка-запоминание»
КВ	– короткие волны
КФНЧ	– корректирующий фильтр ФНЧ
МК	– микроконтроллер
ММ	– математическая модель
НЛЧ	– непрерывная линейная часть
НС	– накапливающий сумматор
НЭ	– нелинейный элемент
ОГ	– опорный генератор
ОНЧ	– очень низкие частоты
ОСП	– отношение сигнал/помеха
ОУ	– операционный усилитель

П – сигнал переполнения
ПАВ – поверхностная акустическая волна
ПД – помеха дробности
ПЗН – пропорциональная зарядовая накачка ЗН
ПП – переходной процесс
ППРЧ – псевдослучайная перестройка рабочей частоты
ПСС – побочные спектральные составляющие
ПФ – полосовой фильтр
ПЭВМ – персональная ЭВМ
ПЭР – полоса эффективного регулирования в системе ИФАПЧ
РДЧ – рабочий диапазон частот
РПдУ – радиопередающее устройство
РПрУ – радиоприемное устройство
РЛС – радиолокационная станция
РЭ – релейный элемент
РЭП – радиоэлектронное противодействие
РЭР – радиоэлектронная разведка
РЭС – радиоэлектронное средство
СВЧ – сверхвысокие частоты
СМ – смеситель
СПМ – спектральная плотность мощности
СУ – сравнивающее устройство
СУМ – сумматор
СЧ – синтезатор частот
СЧ-ИФАПЧ – синтезатор частот на основе ИФАПЧ
СЧ-ИФАПЧК – СЧ-ИФАПЧ с коммутацией структуры и параметров
ТЗУ – тактическое звено управления
У – умножитель
УКВ – ультракороткие волны
УРС – способ ускорения за счет устранения режима скольжения
ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты
ФВЧ – фильтр верхних частот
ФД – фазовый детектор
ФМ – фазовый модулятор
ФМ – фазовая модуляция
ФНЧ – фильтр нижних частот
ФФ – формирующий фильтр
ФШ – фазовый шум
ФЭ – фиксирующий элемент
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь
ЦВС – цифровой вычислительный СЧ
ЦИ – цифровой интегратор

ЦИС – цифровая ИС
ЧАПЧ – частотная автоподстройка частоты
ЧМ – частотная модуляция
ЧТ – частотная телеграфия
ЧФД – частотно-фазовый детектор
ЧФД/ЗН – частотно-фазовый детектор с зарядовой накачкой
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
ЭЗ – элемент задержки
ЭНП – экстраполятор нулевого порядка

a – заданное значение числа сигнала дробности
$a_{\text{Д}}$ – дробная составляющая числа a
$a_{\text{М}}(t)$ – модуляционная составляющая числа a
a_1, a_2 – постоянные затухания апериодического ПП
B – выигрыш в быстродействии от использования способа ускорения
$B_{\text{БЗ}}$ – выигрыш в быстродействии от использования способа БЗ
$B_{\text{УРС}}$ – выигрыш в быстродействии от использования способа ускорения УРС
$B_{\text{УРС}f}$ – выигрыш в быстродействии по частоте при способе ускорения УРС
$B_{\text{УРС}\varphi}$ – выигрыш в быстродействии по фазе при способе ускорения УРС
$B_{\text{БЗ}f}$ – выигрыш в быстродействии по частоте от использования способа БЗ
$B_{\text{БЗ}\varphi}$ – выигрыш в быстродействии по фазе от использования способа БЗ
b_f, b_{1f}, b_{2f} – амплитуды составляющей колебательного ПП по частоте
$b_\varphi, b_{1\varphi}, b_{2\varphi}$ – амплитуды составляющей колебательного ПП по фазе
$b_{1\text{M}}$ – элемент матрицы $\mathbf{B}_{\text{Д1}}$
C_1, C_2 – конденсаторы корректирующего ФНЧ
C_1, C_2 – емкость конденсаторов C_1, C_2 корректирующего ФНЧ
$c_{1\text{M}f}$ – элементы матриц $\mathbf{C}_{\text{Д1}}$
$c_{1\text{M}\varphi}$ – элементы матриц $\mathbf{C}_{\text{Д1}}$
D – ослабление первой гармоники $F_{\text{R}}(\omega_r)$ в составе выходного сигнала
d_k – неточность компенсации помех дробности
$d_{\text{ФМ}}$ – неточность компенсации помех дробности в ФМ
$e_{\text{N}}(t)$ – сигнал обратной связи на входе ЧФД/ЗН
$e_{\text{R}}(t)$ – опорный сигнал на входе ЧФД/ЗН с выхода ДФКД
e_{RM} – размах амплитуды опорного сигнала $e_{\text{R}}(t)$
$e_{\text{ГУН}}(t)$ – сигнал на выходе управляемого напряжением генератора
$e_{\text{ОГ}}(t)$ – сигнал на выходе опорного генератора

$e_{\text{ФМ}}(t)$ – сигнал на выходе фазового модулятора
$e_{\text{ФНЧ}}(t)$ – сигнал управления частотой ГУН на выходе ФНЧ
$e_{\text{ЧФД/ЗН}}(t)$ – сигнал на выходе детектора ЧФД/ЗН
$F_{\text{М}}(\omega_{\text{М}})$ – частота модулирующего сигнала
$F(\Delta\Phi)$ – нелинейная функция, характеризующая ЧФД/ЗН
$F_1(\Delta\omega)$ – релейная функция разности частот входных сигналов ЧФД/ЗН
F_{R} – частота опорного сигнала с ДФКД
F_{R1} – частота следования импульсов с ДФКД до момента коммутации
F_{R2} – частота следования импульсов с ДФКД после момента коммутации
F_{N} – частота выходного сигнала ДПКД или ДДПКД
f – отстройка частоты от значения частоты несущей
$f_1, f_2, ..., f_{\text{N}}$ – вспомогательные частоты в синтезаторе АВС
$f_1 - f_{10}$ – опорные частоты синтезатора АВС при методе идентичных декад
$f_{\text{вых}}$ – частота выходного сигнала синтезатора АВС
$f_{\text{Г}}$ – частота сигнала на выходе гетеродина в синтезаторе АВС
$f_{\text{ГУН}}(t)$ – частота выходного сигнала синтезатора СЧ-ИФАПЧ
$f_{\text{ГУНн}}$ – нижняя граничная частота перестройки сигнала ГУН
$f_{\text{ГУНв}}$ – верхняя граничная частота перестройки сигнала ГУН
$f_{\text{ОГ}}$ – частота сигнала на выходе ОГ
$f_{\text{С}}$ – частота сигнала на выходе синтезатора АВС
$f_{\text{ср}}$ – частота среза системы ИФАПЧ
$f_{\text{ср}}$ – ширина полосы эффективного регулирования в системе ИФАПЧ
$f_{\text{Т}}$ – частота тактирования цифрового синтезатора ЦВС
$f_{\text{Ш}}$ – шаг сетки частот сигнала на выходе синтезаторов частот
$G(s)$ – передаточная функция приведенной НЛЧ системы ИФАПЧ
$G_{\text{З}}(s)$ – передаточной функцией замкнутого кольца ИФАПЧ
$G_{\text{М}}(s)$ – передаточная функция цепи модуляции
$G_{\text{Н}}(s)$ – передаточная функция НЛЧ системы
$G_{\text{О}}(s)$ – передаточная функция замкнутого кольца ИФАПЧ по ошибке
$G_{\text{Р}}(s)$ – передаточная функция разомкнутого кольца ИФАПЧ
$G_{\text{ФМ}}(s)$ – передаточная функция ФМ
$G_{\text{ФНЧ}}(s)$ – передаточная функция ФНЧ
$G_{\text{ФНЧ2}}(s)$ – передаточная функция ФНЧ второго порядка
$G_{\text{ФНЧ3}}(s)$ – передаточная функция ФНЧ третьего порядка
$G_{\text{З}}(j\omega)$ – частотная передаточная функция замкнутого кольца

$G_{\text{О}}(j\omega)$ – частотная передаточная функция замкнутого кольца по ошибке
$G_{\text{Р}}(j\omega)$ – частотная передаточная функция разомкнутого кольца ИФАПЧ
$G_{\text{ФНЧ}}(j\omega)$ – частотная передаточная функция ФНЧ
$G_{\text{ЧФД/ЗН}}$ – коэффициент передачи частотно-фазового детектора с ЗН
$I_{\text{П}\omega}, I_{\text{П}\varphi}$ – частотная и фазовая интегральные помехи
i – порядок системы ИФАПЧ
i_1 – амплитуда тока 1-ой гармоники «помехового» импульса на выходе ЗН
$i_{\text{ЗН}}$ – значение амплитуды токов накачки ЗН
$i_{\text{ЗН1}}$ – значение токов накачки ЗН до момента коммутации
$i_{\text{ЗН2}}$ – значение токов накачки ЗН после коммутации
$i_{\text{ГИ}}(t)$ – сигнал на выходе генератора импульсов ГИ
$i_{\text{ЗН}}(t)$ – ток накачки заряда и разряда ЗН
$i_{\text{ЗНИ}}(t)$ – ток накачки заряда и разряда интегральной ЗН
$i_{\text{ЗНП}}(t)$ – ток накачки заряда и разряда пропорциональной ЗН
$i_{\text{ЗН}}$ – амплитуда тока $i_{\text{ЗН}}(t)$ накачки заряда и разряда ЗН
$i_{\text{ЗНИ}}$ – амплитуда тока $i_{\text{ЗНИ}}(t)$ интегральной ЗН
$i_{\text{ЗНИу}}$ – амплитуда тока $i_{\text{ЗНИ}}(t)$ интегральной ЗН в режиме ускорения
$i_{\text{ЗНП}}$ – амплитуда тока $i_{\text{ЗНП}}(t)$ пропорциональной ЗН
$i_{\text{ЗНПу}}$ – амплитуда тока $i_{\text{ЗНП}}(t)$ пропорциональной ЗН в режиме ускорения
$i_{\text{У}}$ – ток утечки выходных цепей ЗН и входных цепей фильтра ФНЧ
K – коэффициент усиления корректирующего фильтра ФНЧ
K_{ε} – коэффициент усиления разомкнутой системы ИФАПЧ с ЧФД/ЗН
$\overline{K}_{\varepsilon}$ – относительный коэффициент усиления
$K_1(t)$ – коэффициент передачи коммутируемого тока с выхода ПЗН
$K_2(t)$ – коэффициент передачи коммутируемого тока с выхода ИЗН
k – количество декад синтезатора АВС
k_0 – постоянный коэффициент передачи ФНЧ
$k_{\text{З}}$ – коэффициентом захвата системы ИФАПЧ
$k_{\text{И}}$ – задаваемое число импульсов с начала ПП до момента коммутации
$k_{\text{Н}}$ – коэффициент неравенства амплитуд токов накачки заряда и разряда
$k_{\text{УРС}}$ – коэффициент увеличения значений N_2 и $K_1(t)$ при способе УРС
m – емкость накапливающих сумматоров в ДСМ
M – показатель колебательности по входу системы ИФАПЧ
n – номера импульсов, приходящих на вход ЧФД/ЗН с выхода ДДПКД
$N(t)$ – значение целочисленной части дробного коэффициента деления
N – значение коэффициента деления ДПКД или ДДПКД

N_{N} – значение коэффициента деления дробного делителя частоты ДДПКД

$N_{p_{\text{м}}}$ – средний коэффициент деления за период последовательности ΔN_{N}

N_0 – целочисленная составляющая коэффициента N_n дробного делителя

N_1 – коэффициенты деления ДДПКД до коммутации

N_2 – коэффициенты деления ДДПКД после коммутации

$p_м$ – порядок дельта-сигма модулятора ДСМ

R – коэффициент деления делителя частоты ДФКД

$R_{\text{М}}$ – показатель колебательности по ошибке системы ИФАПЧ

R_1, R_2 – сопротивление резисторов R_1, R_2 корректирующего фильтра ФНЧ

r – порядок корректирующего фильтра ФНЧ

$S_{\text{ГУН}}$ – крутизна характеристики управления частотой генератора ГУН

$S_{\text{ГУН}}(\omega)$ – СПМ шумов на выходе системы ИФАПЧ в пределах ПЭР

$S_{\varphi,\text{ГУН}}(f)$ – СПМ помех дробности на выходе СЧ-ИФАПЧ

$S_{\varphi,\text{вх}}(f)$ – СПМ помех дробности на входе СЧ-ИФАПЧ

$S_{\varphi\text{ДРОБ}}(f)$ – помехи дробности

$S_{\varphi\text{вых}}(f)$ – спектр выходного сигнала системы ИФАПЧ

$S(\omega)$ – спектральная плотность мощности ФШ соответствующих элементов

s – комплексная переменная

T_0 – период опорного сигнала с выхода ДФКД

T_n – интервал времени появления двух соседних импульсов $e_{\text{N}}(t_n)$

T_{kn} – задержка во времени относительно t_n

T_{kn+1} – задержка во времени относительно t_{n+1}

$T_1,...,T_i$ – постоянные времени корректирующего ФНЧ

t_n – моменты времени срабатывания релейного элемента РЭ

$t_{\text{З}}$ – время режима скольжения в системе ИФАПЧ

$t_{\text{К}}$ – время момента коммутация структуры и параметров СЧ-ИФАПЧ

$t_{\text{Ки}}$ – момент коммутация для «идеального» случая

$t_{\text{Ко}}$ – оптимальное время момента коммутация структуры и параметров

$t_{\text{П}}$ – время от момента окончания скольжения до полного окончания ПП

$t_{\text{П}f}$ – время установления частоты после окончания скольжения

$t_{\text{П}\varphi}$ – время установления фазы после окончания скольжения

$t_{\text{У}}$ – время полного окончания переходного процесса

$t_{y\text{УРС}f}$ – продолжительность ПП по частоте в СЧ при способе УРС

$t_{y\text{УРС}_\varphi}$ – продолжительность ПП по фазе в СЧ при способе УРС

$t_{\text{У}0}$ – минимум времени ПП при оптимальном моменте коммутации $t_{\text{Ко}}$

$t_{\text{у}f}$ – полное время ПП по частоте с точностью $Дf_{\varepsilon}$

$t_{\text{у}\varphi}$ – полное время ПП по фазе с точностью $Д\varphi_{\varepsilon}$

$t_{\text{у}2f}$ – продолжительность ПП по частоте в СЧ без коммутации

$t_{\text{у}2_{\varphi}}$ – продолжительность ПП по фазе в СЧ без коммутации

$U(t)$ – сигнал, запускающий передним фронтом таймер

$U_{\text{М}}(t)$ – модулирующий сигнал

$U_{\text{М}}$ – амплитуда сигнала, запускающего передним фронтом таймер

$U_{\text{М1}}$ – амплитуда скачка напряжения в момент окончания режима скольжения

$U_{\text{П}}$ – амплитуда помехи коммутации, создающая скачок частоты $\Delta f_{\text{П}}$

$U_{\text{С1}}(t)$ – напряжение на конденсаторе C_1 корректирующего ФНЧ

$U_{\text{С2}}(t)$ – напряжение на конденсаторе C_2 корректирующего ФНЧ

$U_{\text{С1С2}}$ – напряжение на конденсаторах C_1 и C_2 корректирующего ФНЧ

$U_{\text{ЧФД/ЗН}}(t)$ – сигнал, пропорциональный характеристике $F(\Delta\Phi(t))$

$\mathbf{A}$ – матрица системы ИФАПЧ

$\mathbf{A}_1$ – матрица $\mathbf{A}$ до коммутации системы ИФАПЧ

$\mathbf{A}_2$ – матрица $\mathbf{A}$ после коммутации системы ИФАПЧ

$\mathbf{A}_{\text{Д}}$ – диагональная матрица, содержащая собственные числа матрицы $\mathbf{A}$

$\mathbf{A}_{\text{Д}}^{-1}$ – обратная матрица $\mathbf{A}_{\text{Д}}$

$\mathbf{B}$ – вектор управления

$\mathbf{P}$ – матрица правых собственных векторов матрицы $\mathbf{A}$

$\mathbf{P}^{-1}$ – обратная матрица к матрице $\mathbf{P}$

$\mathbf{D}$ – матрица компенсации для системы ИФАПЧ третьего порядка

$\mathbf{E}$ – единичная диагональная матрица

$\mathbf{X}_{\mathbf{C}}$ – новый вектор состояний, связанный с $\mathbf{X}$ соотношением $\mathbf{X}_{\mathbf{C}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{X}$

$\mathbf{X}_{\mathbf{C}}(0)$ – значение вектора состояния при условии $t = 0$

$\mathbf{X}_{\mathbf{C}}(t_{\text{п}})$ – вектор состояния корректирующего фильтра ФНЧ

$\mathbf{X}$ – вектор состояния системы ИФАПЧ

$\mathbf{Y}$ – вектор выхода системы ИФАПЧ

$\mathbf{C}$ – матрица выхода системы ИФАПЧ

$\mathbf{C}_{\text{Д2}f}, \mathbf{C}_{\text{Д2}fi}$ – первая и вторая строки матрицы $\mathbf{C}_{\text{Д2}}$ соответственно

$\alpha_{2\text{М}}$ – действительное максимальное собственное значение $\mathbf{A}_{\text{Д2}}$

$\mathbf{\Phi}(t)$ – переходная диагональная матрица

z^{-l} – звено задержки на l тактов опорного сигнала $e_{\text{R}}(t)$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – собственные значения матрицы $\mathbf{A}$

$\alpha_{1\text{М}}$ – действительное максимальное собственное значение из $\alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{31}$

$\alpha_{2\text{М}}$ – действительное максимальное собственное значение $\mathbf{A}_{\text{Д2}}$

$c_{1\text{М}f}, c_{1\text{М}fi}, b_{1\text{М}}$ – элементы матриц $\mathbf{C}_{\text{Д1}}$ и $\mathbf{B}_{\text{Д1}}$, соответствующие $\alpha_{1\text{М}}$

$b_{1f}, b_{1fi}, \alpha_{1\text{М}}$ – асимптотические коэффициенты

α_1, β_1 – постоянные затухания апериодического и колебательного ПП

λ_i – собственные числа матрицы $\mathbf{A}$

$\Delta f_{\text{ГУН}}$ – диапазон перестройки частоты управляемого генератора ГУН

Δf_{ε} – точность установления переходного процесса по частоте

$\Delta f_{\text{П}}$ – частотный размах помехи коммутации

$\Delta f(t)$ – отклонение частоты выходного сигнала

$\Delta f_{\text{Н}}(t)$ – начальное отклонение по частоте

$\Delta f_{\text{Н}}$ – амплитуда начального отклонения по частоте

Δf – шаг сетки вспомогательных частот синтезатора АВС

ΔN – шаг изменения коэффициента деления N

ΔN_n – дробная составляющая коэффициент деления ДДПКД

$\Delta N_{\text{П}}$ – приращение коэффициента N при приходе импульса на вход ЧФД/ЗН

$\Delta\Phi(t)$ – фазовое рассогласование сигналов делителей ДФКД и ДДПКД

Δ – цена младшего разряда преобразователя АЦП

$\Delta\varphi$ – скачок разности фаз сигналов на входе детектора ЧФД/ЗН

$\Delta\varphi i$ – постоянная составляющая в фазовом сдвиге сигнала генератора ГУН

$\Delta\varphi_{\varepsilon}$ – точность установления переходного процесса по фазе

$\Delta\varphi(t)$ – аналитическое выражение для отклонения фазы сигнала генератора

$\Delta\varphi_n$ – отклонения фазы сигнала ГУН от стационарного положения

$\Delta\varphi_n$ – уровень помех дробности на выходе СЧ-ИФАПЧ

$\Delta\omega$ – частотное рассогласование сигналов делителей ДФКД и ДДПКД

$\Delta\omega_{\text{З}}$ – полоса частот, в которой система всегда входит в синхронизм

$\Delta\omega_{\text{У}}$ – полоса частот удержания (захвата или синхронизма)

η – переменная длительность импульсов на выходе ЧФД/ЗН

$\eta(t)$ – выходной сигнал НЭ

θ – скважность «помеховых» импульсов на выходе ЧФД/ЗН

λ – псевдочастота

ξ_i – относительный коэффициент затухания

$\xi(t)$ – входной сигнал НЭ

τ – длительность «помеховых» импульсов с выхода ЧФД/ЗН

τ_1, τ_2, τ_3 – постоянные времени

τ_n, τ_{n+1} – длительности управляющих импульсов с выхода ЧФД/ЗН

$\tau_{\text{ГИ}n+1}$ – длительность импульсов компенсации на выходе генератора ГИ

$\Phi_{\text{R}}(t)$ – фаза сигнала с выхода делителя частоты ДФКД
$\Phi_{\text{N}}(t)$ – фаза сигнала с выхода делителя частоты ДДПКД
$\Phi_{\text{ГУН}}(t)$ – фаза сигнала с выхода генератора ГУН
$\Phi_{\text{ГУН}_{\text{М}}}$ – максимальное отклонение координаты $\Phi_{\text{ГУН}}(t)$
$\varphi_{\text{ГУН}}(t)$ – зависимость фазы сигнала с выхода генератора ГУН
$\varphi_{\text{ГУНст}}(t)$ – стационарное значение фазы сигнала с выхода ГУН
$\varphi_{\text{R}}(t)$ – фаза опорного сигнала с выхода делителя частоты ДФКД
$\varphi_{\text{N}}(t)$ – фаза сигнала с выхода дробного делителя частоты ДДПКД
$\varphi_{\varepsilon}(t)$ – фазовое рассогласование сравниваемых сигналов
φ_{R} – значение фазы сигнала с выхода делителя частоты ДФКД
$\varphi_{\text{ЧФД/ЗН}}$ – фазовое рассогласование на выходе детектора ЧФД/ЗН
φ_{N} – значение фазы сигнала с выхода делителя частоты ДДПКД
$\varphi_{\varepsilon}(t)$ – фазовое рассогласование входных сигналов ЧФД/ВЗ
$\varphi_{\varepsilon}(nt)$ – решетчатая функция
w – безразмерная частота
ω – круговая частота
$\omega_{\text{Б}}$ – базовая частота АЧХ разомкнутой системы ИФАПЧ
$\omega_{\text{Б1}}$ – базовая частота от старта ПП до момента коммутации
$\omega_{\text{Б2}}$ – базовая частота на интервале времени после момента коммутации
$\overline{\omega}_{\text{Б2}}$ – нормированное значение базовой частоты $\omega_{\text{Б2}}$
$\omega_{\text{М}}$ – частота сигнала модуляции
$\omega_{\text{ГУН}}(t)$ – зависимость частоты сигнала с выхода генератора ГУН
$\omega_{\text{ОГ}}(t)$ – зависимость частоты сигнала с выхода опорного генератора ОГ
$\omega_{\text{ср}}$ – частота среза системы ИФАПЧ
ω_{N} – частота сигнала с выхода делителя частоты ДПКД или ДДПКД
ω_{R} – частота сигнала с выхода делителя частоты ДФКД
$\omega_{\text{ОГ}}$ – частота сигнала с выхода опорного генератора ОГ
$\omega_{\text{ГУН}}$ – частота сигнала с выхода генератора ГУН
$\omega_{\text{Н}}$ – начальная частота сигнала генератора ГУН

Глава первая

ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ В УСТРОЙСТВАХ СИНТЕЗА И СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

1.1. Принципы построения, технические характеристики, классификация устройств синтеза и стабилизации частот

Успехи в развитии телекоммуникационных систем в значительной степени определяются возможностями выполнения стабильных по частоте и фазе источников колебаний [1, 8]. В любой радиосистеме повышение стабильности частоты и фазы радиопередающего устройства (РПдУ) позволяет уменьшить необходимую ширину полосы пропускания радиоприемного устройства (РПрУ) и тем самым увеличить дальность действия и повысить помехоустойчивость телекоммуникационной системы. Кроме того, высокая стабильность частоты и фазы является необходимым условием качественной передачи информации, а также облегчает решение проблемы электромагнитной совместимости. Теория и расчет систем ИФАПЧ для УССЧ затрагивают весьма широкий круг проблем, относящихся к различным областям радиотехники и техники автоматического регулирования [13, 18, 20]. Поэтому трудно предположить, что вопросы синтеза и стабилизации частот когда-либо потеряют свою значимость при обеспечении частотного плана приемопередающей аппаратуры.

Существенный прогресс в области радиотехники по формированию и обработке полезной информации предъявляет все более жесткие требования к источнику несущего сигнала информационных сообщений. На современном уровне развития систем связи при проектировании возбудителей, которые, как правило, являются основным источником несущей частоты, предпочтение отдается СЧ на базе импульсных систем фазовой автоподстройки частоты (СЧ-ИФАПЧ). Известно, что СЧ-ИФАПЧ широко используются в системах радиосвязи, телевидения и радиолокации, телеметрии и радиоастрономии и других радиотехнических системах. Проектируемые СЧ должны обеспечивать компактное размещение каналов радиосвязи с предельно мелкой сеткой и минимальными допусками на долговременную нестабильность и точность установки частоты, широкий диапазон перестройки, высокую чистоту спектра выходного сигнала и минимально возможное время перехода с одной рабочей частоты на другую.

Массовое использование СЧ-ИФАПЧ в качестве гетеродинов в РПрУ и возбудителей РПдУ мобильных и бортовых радиостанций требует снижения массогабаритных параметров синтезаторов, устойчивости к механическим нагрузкам и изменениям питающего напряжения, низкого энергопотребления, обеспечения рабочих параметров в широком диапазоне температур окружающей среды. Столь широкое применение в настоящее время СЧ-ИФАПЧ в различных видах радиоаппаратуры как устройств формирования дискретного множества частот, а также непрерывный поиск новых технических решений для улучшения их качественных показателей привел к тому, что СЧ выделили в самостоятельный класс радиотехнических устройств.

С появлением СЧ-ИФАПЧ предпринимались различные методы их построения для улучшения качественных показателей и, в особенности, спектральных характеристик. Элементная база для разработки всевозможных синтезаторов с петлей ИФАПЧ непрерывно пополняется все новыми типами интегральных микросхем, реализующими ту или иную поставленную задачу и обеспечивающими те или иные технические характеристики. Применение в современной элементной базе СЧ-ИФАПЧ дробных делителей с переменным коэффициентом деления (ДДПКД) позволило уйти от широко применяемых ранее декадных и многокольцевых синтезаторов и перейти к однокольцевой структуре построения. Синтезаторы, использующие ДДПКД, имеют шаг сетки частот до тысячных долей герца с весьма увеличенной частотой сравнения в детекторе, от которой существенно зависит длительность ПП.

В составе телекоммуникационных систем кольца ИФАПЧ не являются самостоятельными устройствами и требования, предъявляемые к их основным параметрам, определяются параметрами устройств синтеза и стабилизации частот РПрУ и РПдУ комплексной аппаратуры и соответствующими нормами и стандартами. Эксплуатационно-технические параметры УССЧ очень важны для приемопередающей аппаратуры в целом. Являясь сердцем системы настройки, они в основном определяют потребительские свойства конкретной аппаратуры. Поэтому основным критическим компонентом приемопередающей аппаратуры, обеспечивающим шаг, точность настройки и время перестройки по частоте, являются УССЧ, используемые в качестве гетеродина или возбудителя.

На УССЧ полностью распространяются требования к РПрУ и РПдУ по скорости перестройки по частоте, разрешающей способности и чистоте спектра сигнала. В связи с этим постоянно возрастают требования к УССЧ по повышению их динамических характеристик и разрешающей способности при достаточно жестких спектральных, массогабаритных и стоимостных показателях. Требования по динамическим параметрам и чистоте спектра к УССЧ, как правило, находятся в противоречии, разрешение которого представляет трудность при их создании.

Дополнительную трудность представляет расширение диапазона выходных частот при неизменном или даже уменьшенном шаге сетки частот. Поэтому основной проблемой при создании современных УССЧ является нахождение разумного компромисса по преодолению трех антагонистических противоречивых требований: широкодиапазонности, скорости перестройки и чистоте спектра формируемых сигналов. Эти требования актуальны для широкодиапазонной приемопередающей аппаратуры.

Использование УССЧ в аппаратуре средств радиосвязи требует постоянного снижения массогабаритных показателей и энергопотребления при общей тенденции повышения скорости перестройки, определяемой новыми режимами работ. Устройства синтеза и стабилизации частот, используемые в аппаратуре автоматизированного радиомониторинга (АРМ), должны еще в большей степени формировать сигналы с чистым спектром, так как существующая в настоящее время тенденция к увеличению полосы анализируемых сигналов требует этого.

Скорость же анализа обрабатываемых сигналов требует повышения скорости перестройки и широкодиапазонности УССЧ. Поэтому при проектировании и эксплуатации УССЧ учитывают следующие основные технические показатели [10, 14, 16, 25, 28, 99]:

1. Диапазон рабочих частот – область частот между минимальным и максимальным номинальными значениями частоты выходного колебания.

2. Разрешающая способность по частоте или шаг сетки частот $f_{\text{Ш}}$ – минимальный частотный интервал между соседними значениями частоты выходного сигнала.

3. Время установления частоты $t_{\text{у}}$ – наибольшее из времён установления частоты выходного колебания, определяемое как промежуток времени между моментом окончания команды на смену частоты и моментом, после которого отклонение частоты (фазы) не превышает заданного значения.

4. Временная нестабильность частоты (фазы) выходного колебания.

5. Чистота спектра (уровень фазовых шумов (ФШ), высших гармоник, побочные спектральные составляющие ПСС).

Другими не менее важными эксплуатационными параметрами УССЧ являются:

- форма выходного сигнала (синусоидальная, треугольная, импульсная или другая);
- уровень выходного сигнала на заданном сопротивлении нагрузки;
- параметры амплитуды выходного сигнала (стабильность, плоскость вершины, точность повторения);
- непрерывность фазы выходного сигнала при изменениях частоты;
- синхронизация фазы по отношению к периоду внешнего сигнала;
- условия окружающей среды;

- стабильность параметров в условиях окружающей среды;
- масса, габаритные размеры, потребляемая мощность;
- количество и вид требуемых опорных сигналов;
- количество независимых частотных выходов;
- вид управления и формат команд;
- стоимость, надежность, сложность схемного решения.

Как правило, большинство параметров УССЧ взаимосвязано и их реализация обеспечивается компромиссными техническими решениями. Стремление повысить показатели эксплуатационно-технических характеристик УССЧ неизменно приводит к дополнительным исследованиям, совершенствованию и разработке новых способов их построения, а также новых научно обоснованных методов их проектирования.

Остановимся подробнее на основных параметрах и технических характеристиках УССЧ. Поскольку полезным продуктом любого устройства синтеза частот является его выходное колебание, постольку к основным техническим характеристикам относят показатели качества этого колебания. Наиболее важными параметрами УССЧ являются чистота спектра выходных колебаний и время установления частоты. Например, шумы и побочные составляющие в составе выходных колебаний гетеродинных УССЧ являются определяющими при реализации динамического диапазона РПрУ.

Фазовые шумы гетеродинных УССЧ ухудшают динамический диапазон РПрУ и уменьшают его реальную избирательность. Шумы гетеродинных УССЧ в смесителях РПрУ с большим динамическим диапазоном могут приводить к преобразованию наиболее сильных уровней помех на боковых шумовых составляющих колебаний. При приеме сигналов распознать шумовую модуляцию трудно, так как неясно, является ли принимаемый шум внешним шумом эфира или результатом шумового преобразования в РПрУ.

Для наблюдения за полем боя используются разведывательные средства тактического и оперативно-тактического назначения, располагающиеся на наземных и воздушных носителях вблизи линии соприкосновения войск и на некотором удалении от нее. При этом средства разведки и огневого подавления тесно взаимодействуют друг с другом, постоянно обмениваясь информацией. Основные требования к таким системам – повышенный уровень достоверности передачи информации и возможность работы в присутствии РПрУ радиоперехвата и действующих станций помех. Эти требования относительно УКВ радиостанций с угловой модуляцией трансформируются в повышение требований к динамическим параметрам и чистоте спектра гетеродина РПрУ и возбудителя РПдУ. Малошумящий с высоким быстродействием возбудитель должен обладать высоким качеством угловой модуляции, т.е. низким уровнем искажений [16, 17, 23, 28, 88]. Основные требования, предъявляемые к УССЧ радиостанций тактического звена управления (ТЗУ):

- диапазон рабочих частот: 1,5…10000 МГц, при необходимости с переключением поддиапазонов;
- мелкий шаг сетки частот (~ 10 Гц для КВ диапазонов и ~ 2,5 кГц для УКВ диапазонов);
- высокое быстродействие (50…100 мкс);
- жесткие требования по чистоте спектра и фазовой стабильности сигнала несущей;
- наличие в составе УССЧ модуляторов для высококачественной модуляции сигнала несущей в различных режимах;
- минимальные потребление, масса и габаритные размеры.

Принципиальное отличие перспективных радиостанций УКВ радиосвязи ТЗУ от существующего парка радиостанций состоит в наличии возможности организации связи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), что обеспечивает защиту от организованных помех, исключает возможность радиоперехвата и дезинформации, затрудняет пеленгацию радиостанций. Ключевыми элементами радиостанции, работающей в режиме ППРЧ, являются УССЧ, генератор ПСП и блок синхронизации по задержке. Генераторы ПСП управляют устройствами синтеза и стабилизации частот на передающем и приемном концах линии связи.

В новом поколении радиолокационных систем (РЛС) потребуется использовать малошумящие УССЧ с быстрой перестройкой рабочей частоты, позволяющие улучшить характеристики средств защиты от радиоэлектронного противодействия, разрешения целей и подавления многократных ответов на фоне местных предметов. За счет улучшения чистоты спектра излучаемого сигнала и оптимизации процесса селекции движущихся целей можно обеспечить подавление пассивных помех на 40-50 дБ. Существенные улучшения тактико-технических характеристик РЛС неразрывно связаны с такими параметрами УССЧ, как число частотных каналов, полоса перекрытия, время смены частотного канала $t_{\text{у}}$, минимальный шаг перестройки $f_{\text{ш}}$, уровень ПСС, уровень ФШ, долговременная нестабильность и когерентность каналов.

Большое число параметров, взаимно связанных друг с другом, и многообразие возможных структурных схем УССЧ, существенно определяющих связь этих параметров и достижимые их значения, часто затрудняют выбор оптимальной схемы построения. Метод ИФАПЧ часто используется в современных УССЧ для гетеродинов РЛС. Так, в УССЧ приемной системы РЛС одновременно генерируются четыре сигнала в диапазоне 2,48…3,76 ГГц. Опорный сигнал получается с помощью дополнительного кольца ИФАПЧ, где управляемый кварцевый генератор частоты 128 МГц синхронизируется сигналом кварцевого ОГ с частотой 5 МГц. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД) работает на второй промежуточной частоте в диапазоне 48…176 МГц с шагом перестройки 125

кГц. Уровень ФШ при расстройке 1кГц от несущей частоты – 70 дБн/Гц, при расстройке 100 кГц – 110 дБн/Гц.

Для получения минимального времени переключения частот усиление интегратора в кольце ИФАПЧ меняется в зависимости от шага перестройки, сохраняя полосу пропускания кольца максимально возможной. Кроме того, предусмотрено введение специального ускоряющего напряжения в интегрирующий фильтр на выходе ЧФД, в результате чего для шага 5 МГц время установления частоты составляет 20 мкс.

Следует отметить, что фазовый шум является определяющим фактором при выявлении эффективной поверхности цели в радиолокации. Принципиальный характер этого фактора обусловлен, помимо всего прочего, недостаточной развязкой между РПдУ и РПрУ РЛС, вследствие чего шумовой спектр сигнала передатчика проникает на вход приемника, образуя фон, маскирующий слабое отражение от цели. По имеющимся оценкам граница обнаружения целей класса «Стелс» при частоте отстройки от несущей частоты на 1 кГц соответствует значению фазового шума – 130 дБн/Гц.

Для качественной работы аппаратуры необходимо подавление шума на выходе РПдУ в дальней зоне – 193 дБн/Гц и в ближней – 130 дБн/Гц, в то время как существующая аппаратура без принятия мер по снижению шума характеризуется значениями соответственно на 30 дБн/Гц и 50 дБн/Гц хуже. Известно, что шум РПдУ определяется, в первую очередь, шумом возбудительных УССЧ. Построение возбудителей с использованием систем ИФАПЧ получило широкое распространение в широкодиапазонных РПдУ в качестве эффективного способа фильтрации, осуществляемого следящим активным фильтром на основе кольца автоподстройки частоты мощного управляемого автогенератора.

Современная аппаратура АРМ имеет в своем составе: РПрУ, анализирующие состояние эфира с шагом в несколько десятков мегагерц в широких диапазонах частот, РПрУ с шагом в единицы герц, анализирующие состояние эфира в отдельных частях интересуемого диапазона, а также РПрУ, производящие контроль наличия излучения на предварительно заданных частотах. Задачей аппаратуры АРМ является технический анализ обнаруженных радиосигналов. Для достоверного определения амплитудно-частотных, временных параметров сигнала, и его структуры погрешность установки центральной частоты анализируемого диапазона не должна превышать единиц герц. При этом к РПрУ предъявляются требования высокого быстродействия для оперативного изменения анализируемой частоты.

Аппаратура комплексов АРМ должна иметь в составе РПрУ набор гетеродинных УССЧ, в котором можно выделить два основных типа. Первый тип характеризуется мелким шагом частот порядка 5…5000 Гц, быстродействием около 1 мс и уровнем регулярных ПСС не более минус 70 дБ. Второй тип гетеродинных УССЧ должен иметь шаг сетки частот порядка

100…500 кГц, быстродействие 30…200 мкс и уровень ПСС не более минус 80 дБ. Диапазон выходных частот УССЧ определяется задачей, выполняемой радиосредствами и практически может находиться в любом интервале радиодиапазона от очень низких частот (ОНЧ) до СВЧ. Из приведенных требований к техническим параметрам УССЧ очевидно, что наиболее сложной задачей является разработка устройств второго типа, где необходимо обеспечить высокую чистоту спектра сигнала и большую скорость перестройки при малом шаге сетки частот.

Практические схемы УССЧ весьма многочисленны, но можно выделить общие принципы, лежащие в основе их построения. Все методы синтеза и стабилизации частот предполагают процесс, в результате которого одна или дискретное множество частот формируются из одной или нескольких опорных частот с помощью комбинации совокупных элементов устройства.

На рисунке 1.1 представлена классификация методов синтеза частот. В настоящее время существуют следующие основные методы получения дискретного множества частот:

- метод пассивного прямого синтеза, основанный на преобразовании ряда опорных частот с последующим выделением нужной частоты при помощи фильтров;

- метод активного косвенного синтеза, основанный на сравнении выходной частоты с некоторой стабильной частотой и последующей подстройки выходной частоты по сигналу рассогласования при помощи кольца автоподстройки;

- метод комбинированного синтеза, объединяющий в себе пассивные и активные методы синтеза.

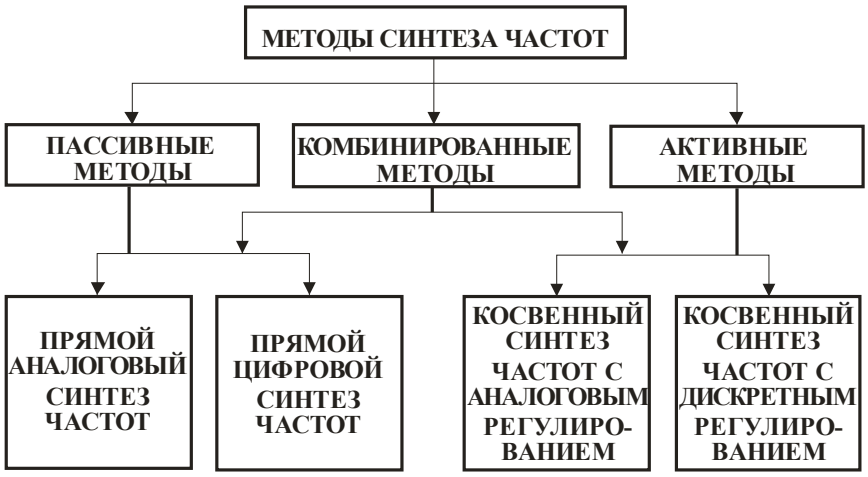

Рис. 1.1. Классификация методов синтеза частот

На рисунке 1.2 представлена классификация методов пассивного прямого аналогового синтеза частот (Direct Analog Synthesizer – DAS). На ранней стадии развития устройства синтеза частот состояли из автогенератора

с кварцевой стабилизацией частоты и магазина переключаемых вручную кварцевых резонаторов. Такие устройства, реализованные по методу «кварц-волна», использовались при небольшом множестве синтезируемых частот (менее 10). С целью увеличения множества рабочих частот были разработаны устройства, известные под названием систем многоопорного некогерентного синтеза частот.

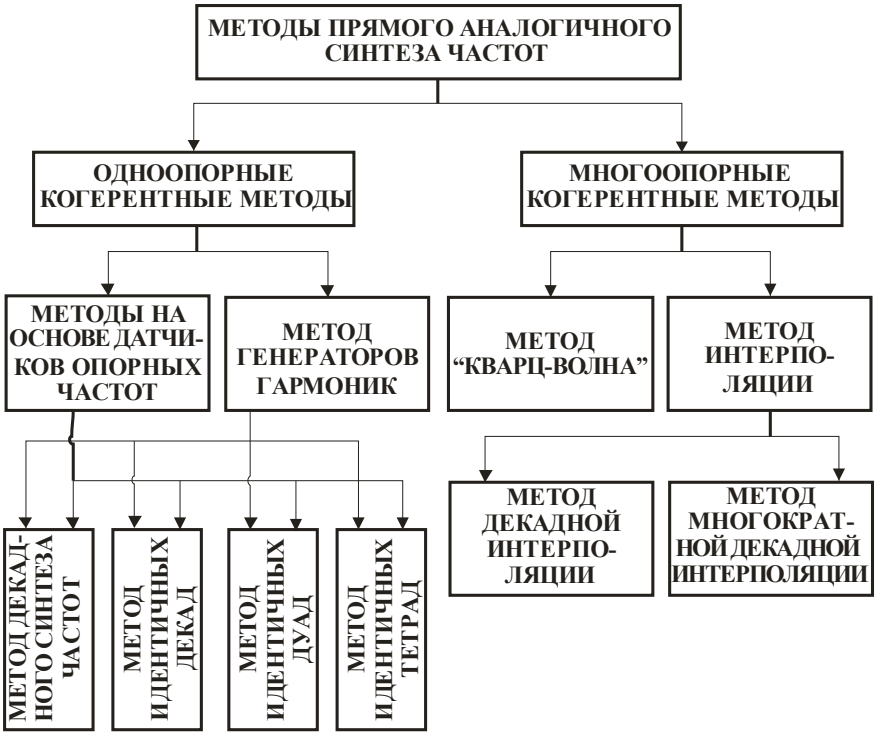

Рис. 1.2. Классификация методов прямого аналогового синтеза частот (DAS)

Метод активного косвенного синтеза (метод анализа) построения СЧ основан на анализе частот. В СЧ, построенных по методу анализа, можно выделить три основных функциональных элемента:

– управляемый напряжением по частоте автогенератор (ГУН), частота колебаний которого является выходной частотой СЧ;

– цепь коррекции частоты ГУН (для коррекции частоты используются системы частотной или фазовой автоподстройки частоты, поскольку системы ИФАПЧ обеспечивают меньшую нестабильность частоты ГУН, чем системы частотной автоподстройки);

– тракт анализа или тракт приведения частоты выходного сигнала ГУН.

Разнообразные схемы СЧ, построенных по методу активного косвенного синтеза частот, можно разделить на две разновидности: 1) с суммированием–вычитанием частоты в тракте приведения; 2) с делением частоты в тракте приведения.

В настоящее время подавляющее большинство современных СЧ строится на основе метода активного косвенного синтеза с использованием системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты. Устройства формирования дискретного множества частот на основе метода ИФАПЧ называют активными синтезаторами частот или СЧ-ИФАПЧ [25].

СЧ-ИФАПЧ называют активным потому, что они содержат источник вторичных колебаний – ГУН. Колебание ГУН всегда присутствует на выходе кольца ИФАПЧ. В случае исчезновения выходного колебания опорного генератора кольцо ИФАПЧ формирует низкое управляющее напряжение ГУН и его частота при этом находится в нижней части диапазона перестройки данного генератора. Частота ГУН не будет когерентна опорному колебанию, что неприемлемо для многих практических применений. Поэтому на выходе современных схем СЧ-ИФАПЧ предусматривается наличие сигнала контроля синхронизма, что позволяет однозначно судить о наличии синхронизма в кольце.

Стабилизация дискретного множества частот осуществляется в СЧ-ИФАПЧ с помощью применения в их составе программируемых цифровых делителей частоты. Использование особенностей фильтрующих свойств системы ИФАПЧ позволяет получать колебания с номинальными значениями частот, равными сотням-тысячам МГц, спектр фазовых шумов которых в широкой полосе частот имеет уровень ниже, чем у получаемого с помощью кварцевого автогенератора колебания, частота которого приведена к соответствующему номиналу.

Подавляющее большинство современных устройств синтеза и стабилизации частот строятся на основе методов импульсно-фазовой автоподстройки частоты. Классификация методов косвенного синтеза частот с дискретным регулированием приведена на рисунке 1.3.

Согласно рис. 1.3, основные методы ИФАПЧ можно разбить на три основные группы: метод ИФАПЧ с предварительным делением в тракте приведения; метод ИФАПЧ с делением частоты в тракте приведения и метод ИФАПЧ с использованием смесителя СМ и гетеродина в тракте приведения. В качестве сравнивающего устройства (СУ) в этих системах ИФАПЧ могут использоваться: перемножающий ИФД [2, 17]; триггерный ИФД [17]; ИФД «выборка-запоминание» ИФД/ВЗ [55, 100, 101]. Однако в настоящее время наибольшее практическое применение получил ЧФД с тремя устойчивыми состояниями с зарядовой накачкой (ЗН) или ЧФД/ЗН [17, 102].

Система ИФАПЧ, как следует из её названия, является дискретной системой автоматического регулирования (системой стабилизации частоты, так как используется опорный сигнал ОГ с неизменяемыми высокостабильными параметрами) частоты настройки, которая определяется частотой опорного сигнала, а сигналом рассогласования является разность фаз опорного сигнала и сигнала обратной связи [17, 103]. Подстройка осуществляет-

ся по разности фаз, система является астатической по отношению к частоте: в установившемся режиме частоты входных сигналов СУ равны.

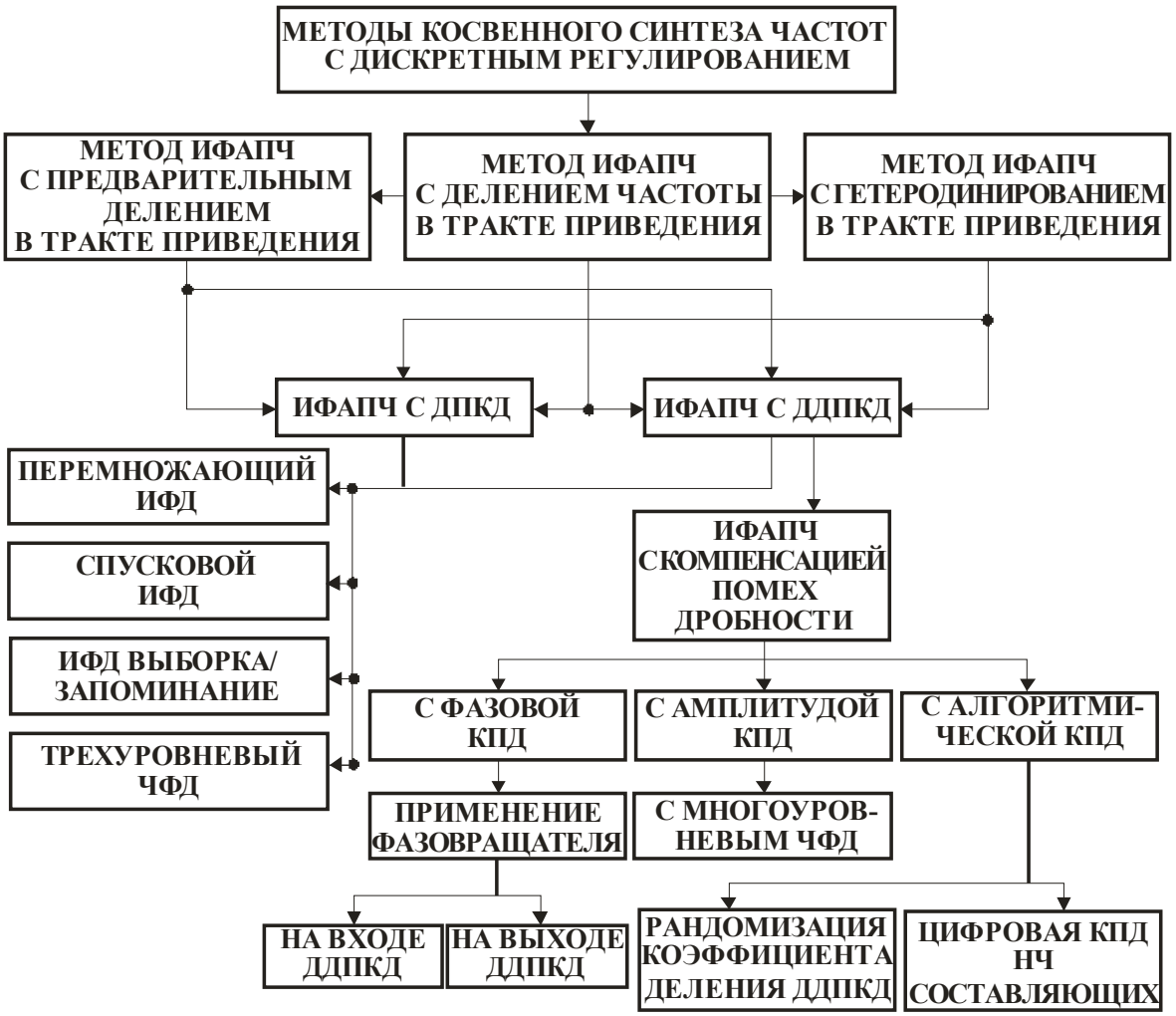

Рис. 1.3. Классификация методов косвенного синтеза частот

При определенных условиях система ИФАПЧ может быть астатической и по фазе. Например, применение в качестве СУ детектора ЧФД/ЗН упрощает схему, увеличивает ослабление помехи с частотой сравнения в спектре выходного сигнала и повышает качество автоподстройки выходного сигнала генератора, управляемого напряжением (ГУН). В таких схемах автоподстройка частоты сигнала ГУН производится с точностью до фазы, что расширяет область их применения в УССЧ приемопередающей аппаратуры. Обычно при построении современных колец ИФАПЧ с ЧФД/ЗН стремятся к тому, чтобы фазовый сдвиг не только оставался постоянным, но и точно равнялся заданному (нулевому) значению, поэтому для реализации такого режима в этих системах применяется пропорционально-интегральное регулирование [17, 103].

Остановимся на рассмотрении основных принципов функционирования системы ИФАПЧ. После завершения ПП в устойчиво работающей схеме ИФАПЧ имеет место соотношение

$$f_{\text{ОГ}} / R = F_{\text{R}} = f_{\text{ГУН}} / N = F_{\text{N}} \text{ или } f_{\text{ГУН}} = \left(f_{\text{ОГ}} / R\right)N = F_{\text{R}} N .$$

Как видно из этих соотношений, при изменении коэффициента деления N на величину ΔN, значение $f_{\text{ГУН}}$ изменяется на величину $\Delta f_{\text{ГУН}} = \Delta N F_{\text{R}}$. Таким образом, изменяя по заданному закону целочисленный коэффициент деления частоты N, имеется возможность цифровым способом изменять значение $f_{\text{ГУН}}$ выходного аналогового сигнала ГУН. Каждое из множества возможных значений частот будет иметь значение долговременной нестабильности частоты, задаваемой высокостабильным ОГ. Поскольку минимально возможное целочисленное значение $\Delta N = \pm 1$, то, очевидно, что минимальное значение дискретного приращения частоты выходного сигнала системы ИФАПЧ $f_{\text{ГУН}}$, называемое шагом сетки частот $f_{\text{Ш}}$, равно значению частоты F_{R}. Изменяя величины F_{R} и R можно получить практически любое требуемое значение шага сетки частот $f_{\text{Ш}}$, причем, величину R также можно изменять цифровым способом в достаточно широких пределах.

1.2. Критический анализ основных режимов работы систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты колебаний управляемых генераторов

Измерение фазового рассогласования в системах ИФАПЧ осуществляется с помощью СУ. При изменении фазы на 2π радиан одного из входных сигналов ЧФД/ЗН, используемого в качестве СУ, значение его выходного сигнала возвращается к первоначальному, поэтому статическая характеристика ЧФД/ЗН будет периодической [101, 118]. Таким образом, системы ИФАПЧ относятся к классу нелинейных систем с периодической нелинейностью. Периодическая нелинейность характеристики оказывает существенное влияние на процессы «в большом», при больших рассогласованиях по частоте и фазе. Режим дискретной отработки больших первоначальных рассогласований в системах ИФАПЧ называется режимом захвата.

После отработки больших рассогласований (осуществления захвата) процессы в системе ИФАПЧ обычно таковы, что абсолютная величина рассогласования не превосходит значения π радиан, поэтому при исследовании свойств системы «в малом» периодичность характеристики ЧФД/ЗН можно не учитывать. Характер процессов «в малом» и методы использования этих процессов существенным образом зависят от вида статической характеристики ЧФД/ЗН в пределах одного периода [41, 42].

Системы ИФАПЧ – нелинейные системы с множеством устойчивых состояний равновесия, в общем случае, с несколькими устойчивыми периодическими и квазипериодическими движениями различных типов, со сложным, порой непредсказуемым динамическим поведением при больших расстройках по частоте. Знание характеристик таких состояний и режимов, умение управлять ими является необходимым при инженерном проектировании, как самих систем, так и устройств на их основе, не говоря уже об оптимизации их свойств.

Основными динамическими характеристиками систем ИФАПЧ являются параметры и области существования состояний равновесия. К ним относятся параметры, которые обеспечивают установившиеся движения системы. Они определяют области устойчивости системы «в малом», «в большом» и «в целом», а также параметры ПП [2, 11, 15]. Знание области параметров, в которой система устойчива «в целом», решает проблему надёжности её функционирования.

Обеспечение надёжного функционирования системы ИФАПЧ в условиях устойчивости «в большом» за счёт управления начальным либо промежуточным состоянием позволяет найти компромиссное решение при разработке систем с учётом противоречивости основных характеристик. Знание параметров ПП позволяет решить проблему быстродействия. Большинство задач по отысканию перечисленных характеристик даже применительно к традиционным системам ИФАПЧ второго порядка имеют в лучшем случае приближённое решение. Причина состоит в отсутствии достаточно эффективных методов исследования нелинейных разностных уравнений, описывающих анализируемые модели.

Различают два основных режима работы системы ИФАПЧ. Первый режим – динамический. Он возникает во время ПП, например, при перестройке по частоте, в момент подключения источников питания, во время принудительной модуляции и т.д. Исторически анализу процессов в динамическом режиме уделялось значительное внимание, поскольку при перестройке частоты и вхождении в синхронизм в системе ИФАПЧ в полной мере проявляются нелинейные свойства функциональных элементов кольца. Нелинейность коэффициентов передачи отдельных звеньев существенно влияет как на время ПП, так и на параметр кольца, называемый коэффициентом захвата

$$k_{\text{з}} = \Delta\omega_{\text{з}} / \Delta\omega_{\text{у}},$$

где $\Delta\omega_{\text{з}}$ – полоса частот, в интервале которых система входит в синхронизм при любых условиях, и, прежде всего, при любых начальных расстройках частоты выходного сигнала ГУН относительно частоты опорного колебания; $\Delta\omega_{\text{у}}$ – полоса частот удержания (захвата или синхронизма), то есть тот

диапазон частот перестройки ГУН, при котором в системе сохраняется режим синхронизма при любых начальных условиях и воздействиях [42].

Второй режим работы системы ИФАПЧ – статический. Это основной режим работы. Переходные процессы в системе во время этого режима не происходят, поэтому кольцо ИФАПЧ находится в стационарном режиме в точке устойчивого равновесия. Процесс изучения поведения кольца ИФАПЧ в статическом режиме в условиях воздействия слабых помех называют анализом устойчивости кольца «в малом», а процесс исследования динамических параметров системы – анализом устойчивости «в большом».

Прежде чем продолжить дальнейшее изложение, следует сделать три важных замечания:

Во-первых, система ИФАПЧ является импульсной системой автоматического регулирования. Поэтому при анализе и расчёте ее работы нужно помнить, что фильтрующие свойства любой импульсной системы автоматического регулирования заканчиваются на половинной частоте дискретизации, а применительно к ИФАПЧ – на половинной частоте сравнения $F_{\text{R}}/2$. Особенно это обстоятельство надо помнить при параметрическом синтезе систем ИФАПЧ с различными типами ФНЧ.

Во-вторых, при анализе фильтрующих свойств системы ИФАПЧ ее считают линейной системой автоматического регулирования, несмотря на то, что характеристики отдельных звеньев могут иметь ярко выраженную нелинейность. Такой подход объясняется тем обстоятельством, что в статическом режиме система ИФАПЧ находится в точке устойчивого равновесия – обеспечивает требуемую частоту выходного сигнала с заданным качеством. Качество формируемого колебания требуется высокое – уровень фазовых шумов, например, должен находиться ниже уровня несущей на 70…140 дБ в зависимости от значения отстройки относительно несущей частоты, уровень дискретных ПСС не должен превышать минус 60…80 дБ и т.д.

Обеспечение указанных величин подразумевает малую величину помех, воздействующих на функциональные элементы кольца ИФАПЧ. Поэтому в малых окрестностях точки устойчивого равновесия нелинейные коэффициенты передачи отдельных звеньев можно заменить касательными в точке, то есть линеаризовать систему ИФАПЧ. Ошибка линеаризации будет тем меньше, чем жестче требования к параметрам системы и лучше полученные результаты [17, 23, 25, 42].

Наконец, в-третьих, при анализе фильтрующих свойств системы ИФАПЧ её считают непрерывной системой автоматического регулирования. Такое допущение кажется нелогичным, но оно оправдано. Действительно, кольцо ИФАПЧ является инерционной системой автоматического регулирования – время ПП с точностью до небольшой фазовой ошибки может заканчиваться через 30…50 периодов частоты сравнения, в зависимости от ширины полосы пропускания кольца и его АЧХ и ФЧХ.

Для обеспечения малого уровня дискретных ПСС часто «утяжеляют» ФНЧ – вводят дополнительные звенья, что также увеличивает инерционность кольца. Поэтому в подавляющем большинстве случаев постоянные времени ФНЧ много больше периода дискретизации в кольце – периода сравнения $1/F_{\mathrm{R}}$, и импульсным характером регулирования в системе при анализе ее фильтрующих свойств можно пренебречь.

1.3. Современные направления развития методов ИФАПЧ для устройств синтеза и стабилизации частот приемопередающей аппаратуры телекоммуникационных сетей новых поколений

Рассмотрим современные направления развития теории и практики построения систем ИФАПЧ, использование которых открывает новые перспективы совершенствования УССЧ приемопередающей аппаратуры телекоммуникационных сетей военного назначения, в состав которой они входят. Для этого оценим возможности применения принципов адаптации [90, 91] переменного демпфирования и многошаговых процессов принятия решения при построении схем с дробным делителем в кольце ИФАПЧ [92-95].

Совершенствование широкополосной приемопередающей аппаратуры ведет к значительному ужесточению требований к качественным показателям систем ИФАПЧ. Выполнение поставленных требований часто оказывается не под силу системам ИФАПЧ, спроектированным широко известными методами. Из практических соображений ясно, что требования, предъявляемые к системам ИФАПЧ, определяются их назначением и условиями функционирования. Наиболее часто встречаются требования уменьшения шумов и ПСС, увеличения быстродействия при смене рабочих частот, обеспечения низкой колебательности ПП [61-64, 104, 122, 123]. Ситуация осложняется тем фактом, что требования к системам ИФАПЧ являются противоречивыми, взаимно исключающими друг друга. С целью удовлетворения этих противоречивых требований переходят к построению более сложных схем ИФАПЧ, что не всегда оправдано.

Были выявлены основные проблемы в создании перспективных систем ИФАПЧ и намечены основные пути преодоления главного противоречия, присущего ИФАПЧ – сложность одновременного обеспечения высокого быстродействия и спектральной чистоты генерируемых колебаний при заданном шаге сетки выходных частот. Было предложено несколько оригинальных технических решений по смягчению приведённого выше противоречия [122, 123].

В частности, был сделан вывод о том, что разрешение основного противоречия в системе ИФАПЧ (или более конкретно – повышение быстродействия системы) можно достичь, используя два основных подхода. Во-

первых, путём повышения одним из известных способов частоты сравнения (частоты дискретизации в системе ИФАПЧ) при сохранении заданного шага сетки частот. При этом, как правило, усложняется структура устройства. Во-вторых, с помощью увеличения быстродействия собственно системы ИФАПЧ с сохранением равенства частоты сравнения в детекторе и шага сетки частот. Возможны комбинации этих методов.

Из способов возможного повышения быстродействия систем ИФАПЧ за счет повышения частоты сравнения можно выделить следующие:

1. Применение схем с ДДПКД, которые позволяют при высокой частоте сравнения получить шаг в коэффициент дробности раз меньше частоты сравнения [96, 105-109].

2. Применение схем с целочисленными делителями частоты ДПКД, на вход, которых сигнал от ГУН поступает через управляемый фазовращатель. В случае применения квадратурного фазовращателя частота сравнения в четыре раза выше шага сетки частот.

3. Применение схем с использованием алгоритмов аппроксимации. В данном случае производится программирование значений целочисленных коэффициентов деления частотных делителей ДФКД и ДПКД таким образом, чтобы соотношение

$$f_{\text{ГУН}} = \left(f_{\text{ОГ}} / R\right)N = F_{\text{R}} N$$

выполнялось с заданной точностью при частоте сравнения в несколько раз выше шага сетки частот [17, 25].

Остановимся подробнее на вопросе ускорения динамических процессов при смене рабочей частоты формируемого сигнала. Основные способы повышения быстродействия колец ИФАПЧ можно разбить на две группы [64, 122]:

- первая группа способов основана на увеличении частоты сравнения за счет использования нескольких колец ИФАПЧ или применения ДДПКД;

- вторая группа способов основана на изменении характеристик канала управления частотой сигнала ГУН и реализации благоприятных фазовых соотношений на входе сравнивающего устройства.

Что касается первой группы, то переход к построению схем на основе многокольцевых систем ИФАПЧ сопряжен со значительными сложностями схемотехнической реализации. Устройства с многокольцевой системой ИФАПЧ, используемые для получения мелкой сетки в СВЧ диапазоне частот при относительно высокой частоте сравнения, достаточно подробно описаны в [14, 16]. Из второй группы следует выделить методы, использующие изменение характеристик канала управления частотой сигнала ГУН в системе ИФАПЧ и реализующие благоприятные фазовые соотношения на входе СУ при замыкании кольца. Среди этих методов в качестве наиболее перспективных выделяются методы, использующие изменение характери-

стик канала управления в системе ИФАПЧ с дробным делением частоты и реализующие благоприятные фазовые соотношения при замыкании кольца одновременно.

Несмотря на то, что идеи использования дробного деления появились более 35 лет назад [105, 106], долгие годы их не удавалось довести до массового производства. Замечательным свойством схем с ДДПКД стала возможность существенного повышения (до нескольких порядков) частоты сравнения в системе ИФАПЧ по отношению к заданному шагу сетки частот при сохранении однокольцевой структуры. Усложнение схемы при этом касается сравнительно низкочастотной части цифрового устройства управления ДДПКД. Это весьма заманчиво с точки зрения технологии производства, сокращения массогабаритных показателей и энергопотребления.

В то же время методу присущи и серьёзные недостатки. В соответствии с принципом работы ДДПКД импульсная последовательность на его выходе неравномерна по времени, что приводит к появлению в спектре выходного сигнала побочных спектральных составляющих помех дробности (ПД) на частотах, отстоящих от несущей на величины, кратные шагу сетки частот. Простое сужение полосы пропускания ФНЧ в цепи управления для обеспечения заданного качества спектра чаще всего сводит на «нет» весь выигрыш от увеличения частоты сравнения и не позволяет существенно повысить быстродействие системы ИФАПЧ.

За последние десятилетия было предложено большое количество технических решений, направленных на снижение уровня ПД [96, 109]. Все они могут быть условно отнесены к следующим видам: методы рационального изменения во времени коэффициентов деления ДДПКД, методы компенсации помех дробности (как аналоговые, так и цифровые или аналого-цифровые, комбинированные методы, сочетающие эти методы). В основе методов первой группы лежит идея отыскания алгоритмов управления ДДПКД, обеспечивающих не только требуемый дробный коэффициент (при усреднении на определённом интервале времени), но и позволяющих перераспределять энергию отдельных составляющих в спектре ПД. В ряде случаев удавалось полностью исключить некоторые гармоники, но кардинального снижения уровня ПД в достаточно широкой полосе частотных отстроек от частоты несущего колебания детерминированные алгоритмы не обеспечивали [97, 98, 125-128]. Эти методы аналоговой компенсации помех дробности также не получили широкого распространения из-за очевидных ограничений, обусловленных низкой технологичностью и связанных с необходимостью настройки схем и нестабильностью степени компенсации в реальных условиях эксплуатации.

В настоящий момент наиболее эффективным методом компенсации ПД является метод, использующий многоразрядное квантование коэффициента деления делителей частоты совместно с устройствами формирования сигналов по методу дельта-сигма модуляции [130, 131]. Развитие этой тео-

рии дало толчок к созданию схем для реализации цифрового метода компенсации помех дробности в системах ИФАПЧ с ДДПКД, управляемыми дельта-сигма модуляторами (ДСМ).

Ситуация с использованием ДДПКД кардинально изменилась лишь к концу 90-х годов XX века, когда стали получать техническое воплощение идеи автоматического формирования сигналов управления делителем [132, 133]. Такой подход позволил не только исключить необходимость отыскания и программирования определенного закона управления коэффициентами – система автоматически генерирует управляющие коды, но, и самое главное, получить весьма благоприятное перераспределение энергии в спектре ПД.

Использование для этого схем ДСМ дает возможность существенно снизить спектральную плотность ПД в области низких частот, что позволяет использовать сравнительно широкополосные ФНЧ, не приводящие к значительному снижению быстродействия систем ИФАПЧ. Возрастание уровня ПД в области высоких частот удается компенсировать соответствующим выбором крутизны спада АЧХ фильтра ФНЧ (выбором порядка фильтра). Шаг сетки частот и, соответственно, расстояние между гармониками помех дробности в таких системах ИФАПЧ определяется величиной шага сетки частот

$$f_{\text{Ш}} = F_{\text{R}} / 2^m,$$

где m – разрядность двоичного представления дробной части N или количество разрядов накапливающих сумматоров (НС) в схеме ДСМ. Учитывая, что в реальных схемах величина m может достигать значений 18…22, становится очевидным, что величина шага сетки частот $f_{\text{Ш}}$ может быть уменьшена до сотен и даже десятков герц.

Столь длинные управляющие последовательности уже приближаются к хаотическим, а спектр ПД, порождаемый ими, стремится к непрерывному с уменьшением уровней отдельных дискретных компонентов. Важно отметить, что на степень перераспределения энергии помех дробности в таком спектре можно влиять выбором порядка ДСМ. Чем выше порядок используемой схемы модулятора, тем сильнее подавляются низкочастотные компоненты и, соответственно, возрастают высокочастотные. Еще одно достоинство систем ИФАПЧ со схемами ДСМ – возможность получения предельно простыми средствами (без применения дополнительных устройств) угловой модуляции сигнала [134]. Для этого необходимо лишь сформировать цифровую модулирующую последовательность, управляющую величиной коэффициента деления $N(t)$, среднее значение которой в данном случае будет не константой, определяющей дробную часть коэффициента деления N относительно медленно меняющейся функции времени.

Перечисленные выше уникальные характеристики систем ИФАПЧ с дробными делителями ДДПКД, управляемыми ДСМ, открывают широкие перспективы для их практического применения. Прежде всего, это относится к приемопередающей аппаратуре телекоммуникационных систем военного назначения, в которых эти преимущества наиболее очевидны. Если несколько лет назад при реализации РПрУ мониторинга радиочастотного спектра, анализаторов спектра и т.п., ориентировались, в основном, на использование многокольцевых структур, включающих устройства ЦВС частот [94, 135], то в последнее время появилась возможность обеспечить практически те же качественные показатели более простыми схемами ИФАПЧ с ДСМ. Действительно, последние, проигрывая пока устройствам ЦВС в минимальном значении шага сетки частот $f_{\text{Ш}}$ и быстродействии, на порядок превосходят их по максимальному значению выходной частоты и чистоте спектра выходного сигнала при гораздо меньшем энергопотреблении.

Целочисленный и дробный способ деления частоты в системе ИФАПЧ дополняют друг друга. Однако преимущества дробного деления в УССЧ значительны и повлияют на дальнейшее развитие схем формирования высокостабильных колебаний. Системы ИФАПЧ, использующие как дробные, так и целочисленные делители частоты, подвергаются различным способам увеличения быстродействия. Однако применение в них дробного деления частоты вместо целочисленного обычно приводит к уменьшению времени ПП (для равных значений полосы пропускания колец ИФАПЧ). Это происходит в связи с более высокой частотой сравнения в детекторе.

Следовательно, применение дробного деления может значительно повысить быстродействие, так как даёт возможность расширить полосу пропускания кольца, удовлетворяя аналогичным требованиям подавления паразитных импульсов с частотой сравнения. Можно с достаточно высокой вероятностью предсказать, что дробное деление частоты – наиболее перспективное в будущем направление развития систем ИФАПЧ.

Все используемые на практике способы повышения быстродействия систем ИФАПЧ обладают различными потенциальными возможностями по динамическим и спектральным характеристикам, а также различными аппаратурными затратами на реализацию каждого способа. Примерами практической реализации систем ИФАПЧ с изменением характеристик канала управления и реализации благоприятных фазовых соотношений могут служить устройства в интегральном исполнении типа PMB2306/7 фирмы Siemens, а также LMX2306/16/26 фирмы National Semiconductor [136]. В этих устройствах применяется ФНЧ с переменной полосой пропускания, которая вводится в систему для улучшения качества ПП, а также для повышения чистоты спектра выходного сигнала в установившемся режиме, что достигается значительным увеличением коэффициента усиления системы ИФАПЧ при одновременном уменьшении постоянных времени ФНЧ.

Кроме того, для оптимизации времени ПП в систему ИФАПЧ вводится переменное демпфирование (изменение величины демпфирующего резистора ФНЧ). В начале ПП, когда сигнал рассогласования велик, демпфирование в системе почти отсутствует, тем самым обеспечивается максимально возможная скорость нарастания процесса в течение 30…50 периодов частоты сравнения, увеличенной на это время в четыре раза. По мере уменьшения сигнала рассогласования демпфирование увеличивается и в конце ПП становится равным расчетному значению для установившегося режима.

В свою очередь это ведет к сужению полосы пропускания системы ИФАПЧ, то есть замедляет реакцию системы, предотвращая тем самым значительную величину перерегулирования и излишнюю колебательность процесса, что важно, например, для телекоммуникационных систем с режимом ППРЧ. Таким образом, введение переменного демпфирования в систему ИФАПЧ обеспечивает режим ПП, близкий к оптимальному динамическому поведению [104].

Рассмотрим подробнее существующие методы повышения динамических характеристик ИФАПЧ с управляемыми цифровыми делителями частоты в цепи обратной связи [137-139]. Одним из способов повышения быстродействия схем с целочисленными коэффициентами деления является использование алгоритмов аппроксимации номинальных значений выходной частоты. Это достигается использованием ДПКД как в цепи обратной связи, так и в тракте опорного сигнала.

Возможность увеличения быстродействия таких систем ИФАПЧ ограничена требованиями по точности шага сетки частот и некоторыми оптимальными пределами изменения частоты сравнения. Дополнительным ограничением применяемости метода является требование наличия специальных вычислителей коэффициентов деления. Реальным является повышение быстродействия в 3…4 раза. Серьезным недостатком этого способа является низкая точность установки номинальной рабочей частоты.

Существуют способы построения систем ИФАПЧ с переменными структурой и параметрами. Эти способы предполагают изменение по определенному алгоритму нескольких параметров функциональных элементов кольца во время ПП: значений коэффициентов деления ДФКД, ДПКД или ДДПКД, изменение частоты сравнения в детекторе, величин тока заряда и разряда зарядовой накачки и постоянных времени ФНЧ.

В схеме ИФАПЧ с делителем частоты ДДПКД, управляемым с помощью модулятора ДСМ, коэффициент деления по сигналу с ГУН формируется из целочисленной и дробной части. Дробная часть коэффициента деления подается на вход ДСМ, а затем на вход суммирующего устройства, где складывается с целочисленной частью. Схема позволяет реализовать шаг сетки частот в 2^m раз меньше, чем частота сравнения в детекторе. Реально получаемое быстродействие составляет десятки микросекунд при шаге сет-

ки частот в единицы герц. Однако при проектировании таких систем ИФАПЧ разработчик сталкивается с проблемой достоверного расчёта их динамических и спектральных характеристик.

Дополнительными способами увеличения быстродействия систем ИФАПЧ является: предварительная установка частоты близкой к номинальному значению; использование принципов оптимального управления [64]; использование детекторов с особой нелинейной характеристикой; изменение коэффициента усиления системы [140, 141]; использование нелинейных и переключаемых ФНЧ [142, 143]; реализация благоприятных фазовых соотношений перед началом и во время переходного процесса (упреждение, то есть блокировка или установка цифровых делителей частоты ДФКД, ДПКД или ДДПКД в исходное нулевое состояние, а детектора с зарядовой накачкой – в третье нейтральное состояние); изменение коэффициентов деления частоты делителей ДФКД, ДПКД или ДДПКД во время переходного процесса при смене рабочей частоты [144]. Однако применение этих методов позволяет получить время ПП лучше, чем продолжительность 5…10 периодов частоты сравнения [141, 144].

Систематизация и классификация этих решений, а также определение тенденций развития теории и техники синтеза и стабилизации частот показала, что из наиболее перспективных выделяются следующие способы:

- изменяющие общий коэффициент усиления системы ИФАПЧ [122, 141];

- изменяющие структуру и характеристики цепи управления генератора, управляемого напряжением, в системе ИФАПЧ [144, 145];

- реализующие благоприятные фазовые соотношения в момент замыкания кольца ИФАПЧ [144, 146].

Первые два способа можно объединить в один – способ изменения полосы пропускания кольца ИФАПЧ. Технически его можно реализовать за счёт раздельного или одновременного переключения величин постоянных времени ФНЧ и коэффициента передачи детектора. При этом момент замыкания кольца ИФАПЧ (выход из третьего состояния) может совпадать с моментом переключения структуры и параметров.

Вопросам применения ФНЧ с изменением его параметров в схеме ФАПЧ уделялось внимание разработчиков. Например, в работе [142] отмечается, что захват частоты узкополосной схемой ФАПЧ можно ускорить, если в начальный момент времени подключить широкополосный ФНЧ, сократив тем самым время синхронизации, обратно пропорциональное полосе пропускания. Однако возврат к исходной полосе вызывает дополнительные ПП в контуре регулирования, которые приводят к потере синхронизма, особенно при большом отношении между двумя полосами пропускания.

В работе [137], посвященной исследованию и разработке устройств синтеза частот для аппаратуры контроля помеховой радиотехнической об-

становки, рассмотрена структурная схема и алгоритм работы системы ИФАПЧ с переключаемым ФНЧ. В составе системы ИФАПЧ в качестве сравнивающего устройства задействован цифровой разностно-кодовый фазовый детектор. В режиме ПП эта система работает с интегрирующим ФНЧ с одной малой постоянной времени, а после вхождения в синхронизм – с пропорционально-интегрирующим ФНЧ с двумя увеличенными постоянными времени, обеспечивающими требуемые спектральные характеристики. Разработана методика инженерного расчёта и проектирования систем ИФАПЧ с цифровым разностно-кодовым фазовым детектором и ФНЧ с переменной структурой. При этом утверждается, что применение переключаемого ФНЧ позволяет повысить быстродействие системы в 20…50 раз.

При построении модели исследуемой системы были сделаны недостаточно обоснованные упрощения и допущения, накладываемые на значения коэффициента усиления непрерывной части системы и постоянных времени переключаемых ФНЧ. Цифровые сравнивающие устройства типа цифровой разностно-кодовый фазовый детектор на практике не нашли должного применения в составе колец ИФАПЧ. Вопрос о выборе момента переключения и возникающих при этом помех в рассматриваемой работе на качественном уровне даже не затронут.

В системах ИФАПЧ с переменными структурой и параметрами с широкими диапазонами перестройки по частоте на начальном участке переходного процесса возникает режим биений или так называемый режим скольжения. Этот режим характерен тем, что фазовое рассогласование сигналов на входах ЧФД/ЗН, используемого в схеме ИФАПЧ, больше 2π. Применение дробных делителей с переменным коэффициентом деления в системе ИФАПЧ приводит к увеличению длительностей ПП, так как доля времени существования режима скольжения в общем времени переходного процесса зачастую становится недопустимо высокой. Для сокращения времени этого явления и уменьшения общего времени ПП предлагается ряд способов, связанных с изменением структуры и значений определённых параметров элементов схемы:

1. Увеличение значения тока зарядовой накачки, возможное уменьшение коэффициентов деления частот, как опорного сигнала, так и сигнала в обратной связи кольца, одновременное уменьшение постоянных времени ФНЧ – способ быстрого захвата (БЗ);

2. Применение коммутации токов накачки в двух устройствах зарядовой накачки (пропорциональной и интегральной) на начальном ускоренном участке ПП при смене частот выходного сигнала системы ИФАПЧ – способ с двумя зарядовыми накачками (ДЗН);

3. Увеличение значения коэффициента деления ДДПКД наряду с уменьшением величины частоты сравнения в ЧФД и повышением тока ЗН

на время переходного процесса при смене частот – способ устранения режима скольжения (УРС).

В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют публикации, в которых бы детально исследовалось качество переходных процессов в системе ИФАПЧ с изложенными выше способами их ускорения. Так, в работе [139] определяется время ПП в системе ИФАПЧ третьего порядка с режимом скольжения, но без изменения её структуры и параметров. В публикациях [147, 148] находится оптимальное время переходного процесса только для линейной непрерывной модели системы ИФАПЧК третьего порядка с реализацией лишь только способа быстрого захвата.

1.4. Пути исследования показателей качества импульсно-фазовой автоподстройки частоты с переменными параметрами

С точки зрения теории автоматического управления рассматриваемая система ИФАПЧ является импульсной системой стабилизации с переменной структурой, нелинейным корректирующим устройством и нелинейным объектом управления, регулирование в котором осуществляется сигналами с широтно-импульсной модуляцией [28, 81]. Вычисление параметров подобной системы аналитическими методами весьма затруднительно и одним из возможных вариантов её синтеза и анализа является математическое моделирование.

Практическое применение различных модификаций систем ИФАПЧ невозможно без их глубокого и всестороннего исследования на основе использования математических моделей (ММ) с дискретизацией по времени и по уровню, и применении при анализе и синтезе таких методов, в которых эти эффекты учитывались в полной мере [24, 26, 72]. Создание таких моделей является сложной задачей, а аналитические исследования их, как правило, либо затруднены, либо вообще невозможны; поэтому высокоточные ММ ориентированы на работу с ПЭВМ. При этом возникает необходимость создания моделей с различной точностью моделирования и скоростью расчетов. Моделирование процессов, происходящих в синтезаторе, является важной частью его проектирования и имеет большое значение для правильного выбора параметров элементов макета. По своей сути, моделирование является ранней стадией эксперимента, а его результаты могут значительно повлиять на дальнейший ход исследовательской работы.

Существует множество программных средств моделирования, среди которых можно выделить пакеты Mathsoft Simulink и Eagleware/Elanix SystemView. Оба пакета предоставляют возможность наглядного построения модели на основе базовых блоков (генераторы, фильтры и т.п.). Однако, в общем случае, эти элементы являются идеальными, что не позволяет точно

отразить особенности того или иного устройства. Кроме того, использование численных методов расчёта, а также ограниченность временной реализации моделируемых процессов приводит к появлению неточностей.

Для описания систем ИФАПЧ с переменными структурой и параметрами наиболее удобен векторно-матричный аппарат, позволяющий создать единую компактную форму математического представления элементов системы [27, 149]. В таких системах с помощью методов теории пространства состояний [4] и спектрального разложения матриц удается получить ее дискретную модель в форме, удобной для реализации на ПЭВМ. В этом случае исследуемые процессы зависят от времени и могут быть легко сравнимы с экспериментальными данными [73].

Анализ моделей в переменных состояния проведем с помощью пакета программ MATLAB. Исследования спектральных и динамических характеристик ИФАПЧ проведем в системе MATLAB (среда визуального моделирования Simulink) [74-77]. Для этого составим имитационную компьютерную модель, позволяющую оценить динамические и спектральные характеристики системы. Для оценки динамических характеристик будем использовать сложную динамическую модель, состоявшую из детектора системы ИФАПЧ – ЧФД/ЗН и цифрового ДДПКД со схемой ДСМ на основе фазового накопителя с пороговым значением $2\pi N$. Фаза сигнала ГУН накапливается до значения $2\pi N$, где N – коэффициент деления делителя на данный такт. По достижении этого порогового значения происходит обнуление накопителя, а на выходе схемы делителя появляются импульсы. Положение этих импульсов на временной оси сравнивается с опорным импульсом в ЧФД системы ИФАПЧ. В результате вырабатывается сигнал рассогласования, управляющий частотой сигнала ГУН.

Современные кольца ИФАПЧ представляют собой сложные динамические системы, обеспечивающие высокую точность отработки сигналов рассогласования в условиях действия различных возмущений и помех. При больших величинах возмущений и уровней помех нарушаются нормальные эксплуатационные режимы, снижается точность автоподстройки частоты, и ухудшаются показатели качества ПП в системах по сравнению с заданными требованиями. Проектирование таких колец ИФАПЧ представляет достаточно сложную проблему, так как в них входят цифровые устройства деления частоты и аналоговый генератор ГУН.

Для получения надлежащих характеристик контура ИФАПЧ проектировщику приходится находить компромиссные решения, так как требования к точности и показателям качества ПП взаимоисключающие. Основной путь преодоления такого противоречия – применение в схеме ИФАПЧ элементов с большими коэффициентами усиления и ФНЧ с переключаемыми во время ПП параметрами. Изменение параметров ФНЧ производится скачкообразно. В результате нарушается стационарность процессов в элементах,

динамика которых в этом случае описывается дифференциальными, интегральными или разностными уравнениями с переменными параметрами. Скачкообразный характер изменения параметров по своему действию эквивалентен введению дополнительных возмущений в системе в строго определённые моменты времени (моменты переключения). Все эти явления крайне нежелательны, так как они приводят к снижению точности и ухудшению показателей качества регулирования [5, 6, 9]. Необходимость учета влияния нелинейностей и непостоянства параметров устройств и объектов вынуждает исследователей отказаться от традиционных методов описания динамики процессов [7, 12].

При разработке систем ИФАПЧ для УССЧ аппаратуры телекоммуникационных сетей военного назначения большое внимание уделяется их динамическим характеристикам. При исследовании свойств динамического поведения ИФАПЧ особенно важной характеристикой является время ПП – время перестройки с одной частоты на другую, которое характеризует быстродействие приемопередающей аппаратуры в целом. Основная трудность, с которой приходится сталкиваться разработчикам, – сложность получения аналитических решений при исследовании системы традиционным методом [17, 39]. Это связано с необходимостью решать уравнения высокого порядка и с нелинейными характеристиками отдельных функциональных элементов системы. Одной из целей книги является получение нелинейной инерционной модели системы ИФАПЧ с ФНЧ различных типов, а затем исследование ее динамических характеристик.

Разрабатываемая модель основывается на алгоритмическом методе моделирования [75], предполагающем создание цифровых моделей, отражающих структуру и параметры отдельных элементов системы ИФАПЧ. Выбранный метод позволяет сначала создать цифровую модель для каждого звена кольца ИФАПЧ, а затем получить его полную модель. Из всего многообразия схем ИФАПЧ в качестве объекта моделирования была выбрана следующая структура: схема ИФАПЧ с ЧФД/ЗН и пассивным ФНЧ в цепи управления частотой сигнала ГУН с ДДПКД в цепи обратной связи.

Развитие техники синтеза и стабилизации частот невозможно без прогресса в области развития методов исследования ПП и различных режимов работы систем ИФАПЧ. Это следует отнести к трудно поддающимся обычным методам расчёта динамических, квазиустановившихся и скользящих режимов работы [5-7, 9, 12]. Проектирование перспективных систем ИФАПЧ требует сложных предварительных расчетов и исследовательских работ. Несмотря на значительные успехи, достигнутые современной теорией ПП в системах ИФАПЧ, расчету с необходимой точностью поддаётся весьма узкий круг задач, при этом сами расчеты, как правило, весьма трудоёмки и громоздки. Аналитические методы исследования в этом случае удается применить крайне редко.