

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.10>

УДК: 621.373 : 621.396

АНАЛИЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕТЕРОДИНА ПРИЕМНИКА ПОД НЕСУЩЮЮ ЧАСТОТУ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО ПЕРЕДАТЧИКА

И.Е. Чухломин, А.В. Трубников, Г.Ю. Лашкевич

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
197101, г. Санкт-Петербург, ул. Чапаева, д. 30

Статья поступила в редакцию 11 июля 2022 г.

Аннотация. Рассмотрен принцип работы цифровой системы автоматической подстройки частоты гетеродина приемника под несущую частоту импульсного магнетронного передатчика. Проведен анализ частотного дискриминатора, реализованного на двух взаимно расстроенных контурах. Проведен анализ цифрового квадратурного автокорреляционного частотного дискриминатора. Исследован переходный процесс установки частоты цифровой системы автоматической подстройки частоты с двумя видами частотных дискриминаторов.

Ключевые слова: РЛС, импульсный магнетронный передатчик, автоматическая подстройка частоты, частотный дискриминатор.

Автор для переписки: Чухломин Иван Евгеньевич, rus-fan@mail.ru

Введение

В настоящее время лидирующую позицию на рынке источников электромагнитных колебаний занимают импульсные магнетронные передатчики. Благодаря высокому КПД, компактности, надежности, большой

мощности генерируемых электромагнитных колебаний они нашли широкое применение в радиолокационных и навигационных системах, медицине и других отраслях [1]. К основным недостаткам импульсных магнетронных передатчиков можно отнести девиацию частоты и сложность реализации перестройки частоты. По этой причине используют автоматическую подстройку частоты (АПЧ) гетеродина приемника, а не магнетронного передатчика. К основным параметрам АПЧ относятся точность и меньшая длительность переходного процесса установки частоты [3].

Анализ существующих методов подстройки частоты [2,4], показывает, что значительная часть систем АПЧ реализована в аналоговом виде, что в свою очередь ведет к ухудшению характеристик подстройки частоты гетеродина, требует больших трудозатрат на настройку, а также проигрывает по массогабаритным характеристикам.

Применение цифровой элементной базы в системе АПЧ, позволит существенно повысить точность подстройки частоты, заметно снизить время переходного процесса установки частоты, упростить настройку и снизить массогабаритные характеристики.

Для обеспечения вышеперечисленных основных параметров АПЧ, целесообразно использовать цифровую следящую систему АПЧ.

1. Принцип работы цифровой АПЧ

Общая структурная схема цифровой АПЧ (ЦАПЧ) показана на рис. 1. Схема ЦАПЧ работает следующим образом. Сигнал от импульсного магнетронного передатчика $\Delta f_{\text{зонд}}$ с ослаблением порядка 20÷50 дБ поступает на вход смесителя. На другой вход смесителя через делитель мощности (ДМ) подается сигнал от гетеродина приемника $\Delta f_{\text{ГУН}}$, в качестве которого выступает генератор управляемый напряжением (ГУН).

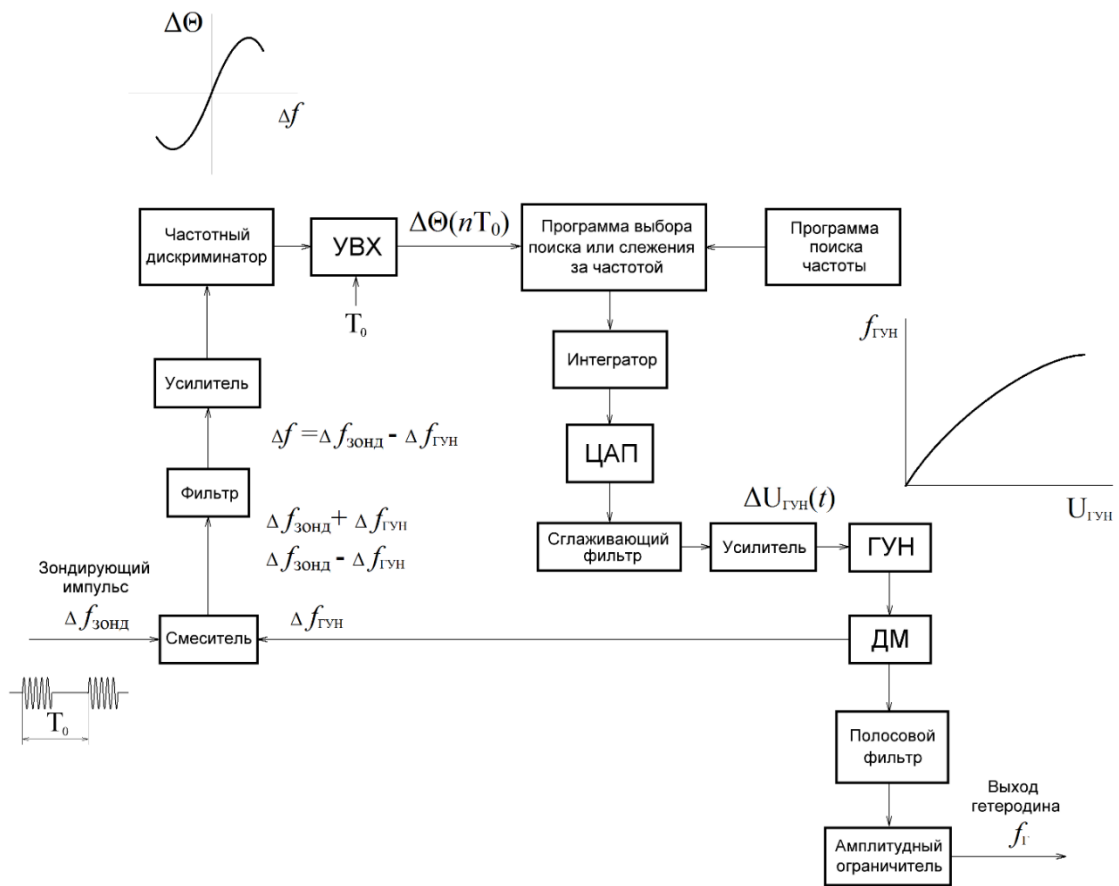


Рис. 1. Структурная схема ЦАПЧ

Выходной сигнал смесителя с разностной частотой $\Delta f = \Delta f_{\text{зонд}} - \Delta f_{\text{ГУН}}$ выделяется фильтром и масштабируется с помощью усилителя, затем усиленный сигнал поступает на частотный дискриминатор (ЧД). ЧД преобразует входную частоту Δf в значение $\Delta \Theta$, которое пропорционально напряжению управления ГУН $\Delta U_{\text{ГУН}}(t)$. Устройство выборки-сравнения (УВХ) квантует и хранит выходной сигнал ЧД $\Delta \Theta$ с периодом T_0 , равным периоду зондирования. Выходной сигнал с УВХ $\Delta \Theta(nT_0)$ поступает на блок программы выбора поиска или слежения за частотой АПЧ. В режиме «Поиск» активируется программа поиска частоты, напряжение управления ГУН $\Delta U_{\text{ГУН}}(t)$, в этом случае, изменяется по периодическому линейно-нарастающему закону через всю шкалу управления частотой ГУН. При обнаружении сигнала разностной частоты Δf , блок программы выбора поиска или слежения за частотой переходит в режим «Слежения» (захват частоты). Интегратор выполнен в дискретном виде и предназначен для введения в систему управления АПЧ астатизма. Цифро-

аналоговый преобразователь (ЦАП) в совокупности со сглаживающим фильтром и усилителем формируют управляющее напряжение управления ГУН $\Delta U_{\text{ГУН}}(t)$. Балансный делитель мощности (ДМ) распределяет выходную частоту ГУН $\Delta f_{\text{ГУН}}$ на смеситель и на выход гетеродина приемника $\Delta f_{\text{Г}}$. Полосовой фильтр с амплитудным ограничителем в канале гетеродина приемника $f_{\text{Г}}$ необходимы для исключения влияния паразитной амплитудной модуляции.

Рассмотрим принцип работы следящей системы ЦАПЧ. Упрощенная цифровая детерминированная следящая система управления АПЧ, без учета нелинейных характеристик смесителя, ЧД, ГУН, показана на рис. 2.

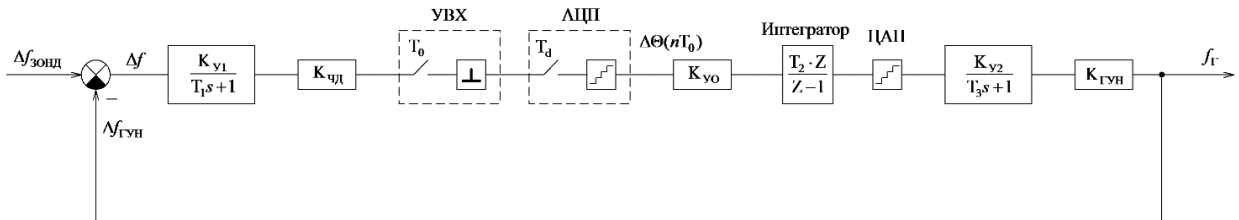


Рис. 2. Следящая система ЦАПЧ

В качестве фильтра и усилителя разностной частоты Δf выступает апериодическое звено 1-го порядка:

$$W_1(s) = \frac{K_{y1}}{T_1 s + 1}, \tag{1}$$

где K_{y1} – коэффициент усиления разностной частоты Δf , T_1 – постоянная составляющая времени, характеризующая полосу пропускания усилителя и фильтра.

Передаточная характеристика ЧД описывается линейным пропорциональным звеном $K_{\text{чд}}$.

УВХ представляет собой звено экстраполятора нулевого порядка:

$$G_0(s) = \frac{1 - e^{-sT_0}}{s}. \tag{2}$$

АЦП предназначен для считывания задержанного сигнала УВХ с периодом дискретизации $T_d \ll T_0$, помимо этого АЦП осуществляет квантование по уровню.

Пропорциональное звено K_{y0} усиливает сигнал $\Delta\Theta(nT_0)$.

Интегратор в дискретном виде представляет собой передаточную функцию:

$$Z \left\{ \left(\frac{T_2}{T_d} \right) \cdot \frac{1}{s} \right\} = \frac{T_2 \cdot Z}{(Z-1)}, \quad (3)$$

где T_2 – константа, определяющая время установления сигнала ошибки $\Delta\Theta(nT_0) \rightarrow 0$.

Квантователь по уровню аналогичен в работе идеальному ЦАП.

В качестве сглаживающего фильтра и усилителя сигнала с интегратора выступает, также апериодическое звено 1-го порядка:

$$W_2(s) = \frac{K_{y2}}{T_3 s + 1}, \quad (4)$$

где K_{y2} – коэффициент усиления сигнала с ЦАП, T_3 – постоянная составляющая времени, характеризующая полосу пропускания усилителя и сглаживающего фильтра.

Передаточная характеристика ГУН, для упрощения следящей системы АПЧ, описывается линейным безынерционным пропорциональным звеном $K_{ГУН}$.

Передаточная функция разомкнутой системы АПЧ по управляющему сигналу $\Delta f_{зонд}$ выглядит следующим образом:

$$W_p(s) = \frac{K \cdot (1 - e^{-sT_0})}{s^2 \cdot (T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}, \quad (5)$$

где $K = K_{y1} \cdot K_{чд} \cdot K_{y0} \cdot \frac{T_2}{T_d} \cdot K_{y2} \cdot K_{ГУН}$.

Как видно из выражения (5), передаточная функция разомкнутой системы АПЧ представляет собой в совокупности интегрирующее звено с запаздыванием, подбор параметров K должен выбираться таким образом, чтобы компенсировать

запаздывание, а также минимизировать время установления сигнала ошибки $\Delta\Theta(nT_0) \rightarrow 0$.

Анализ упрощенной схемы следящей системы ЦАПЧ, показывает, что замкнутая система ЦАПЧ всегда будет устойчивой, при условии, что ЧД и ГУН имеют монотонно возрастающую характеристику.

Основным элементом следящей системы ЦАПЧ является ЧД, характеристики которого влияют на точность и время установки заданной частоты гетеродина.

В системе ЦАПЧ можно использовать несколько принципов построения ЧД [4, 5]:

- ЧД на расстроенных контурах;
- квадратурный автокорреляционный частотный дискриминатор (АЧД).

2. Анализ ЧД на расстроенных контурах

Структурная схема ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами показана на рис. 3.

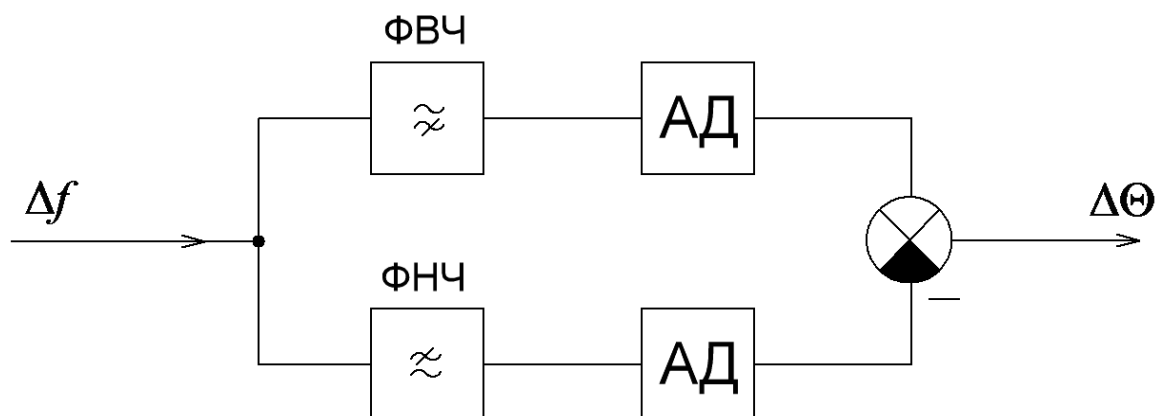


Рис. 3. Схема ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами

ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами работает следующим образом. Сигнал с разностной частотой Δf поступает на вход двух контуров, представляющих собой фильтр нижних частот (ФНЧ), фильтр верхних частот (ФВЧ). Оба фильтра настроены таким образом, чтобы при заданной частоте гетеродина f_0 , обеспечивалось затухание детектируемого сигнала в -6 дБ. Далее,

продетектированный сигнал с обоих контуров поступает на блок вычитания, на выходе которого формируется характеристика ЧД. Импульсное линейное детектирование осуществляется с помощью амплитудного детектора (АД). Необходимо также учитывать нелинейную характеристику АД, представляющую собой нелинейность типа зоны нечувствительности при малых значениях напряжения (менее 0,3 В).

Настройка расстроенных контуров ФНЧ и ФВЧ может быть выполнена двумя способами:

- крутизна спада и подъема амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) соответствует значению ± 6 дБ/окт;

- крутизна спада и подъема АЧХ соответствует значению ± 12 дБ/окт.

На рис. 4 показаны АЧХ расстроенных контуров с крутизной спада и подъема ± 6 дБ/окт и ± 12 дБ/окт.

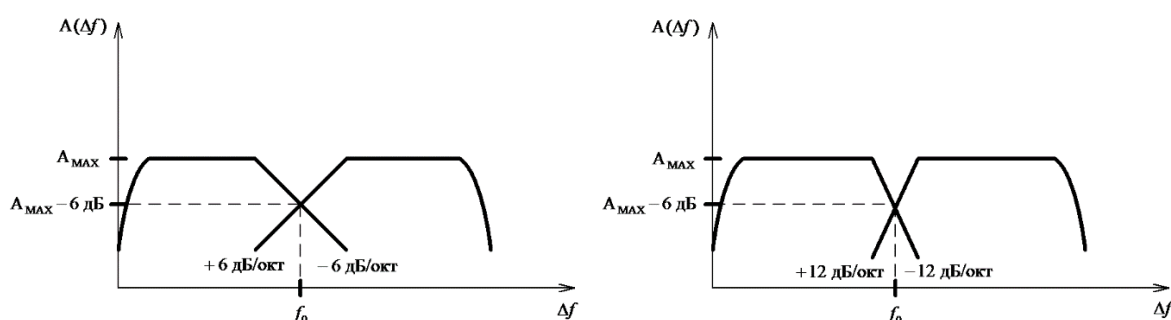


Рис. 4. АЧХ расстроенных контуров ЧД

Характеристики ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами показана на рис. 5.

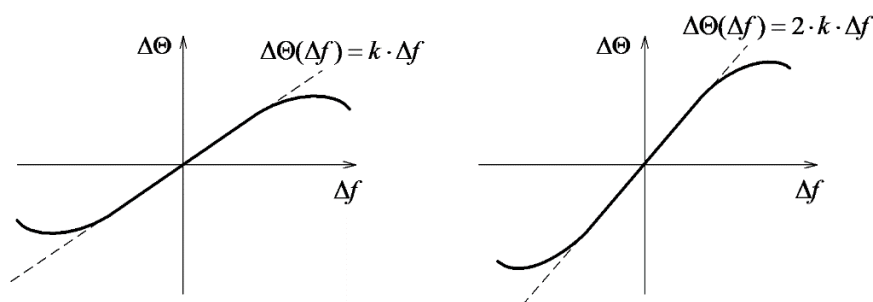


Рис. 5. Характеристики ЧД с двумя взаимно расстроенными контурами

Как видно из рис. 5, линейная характеристика ЧД прямо пропорциональна функции $\Delta\Theta(\Delta f) = k \cdot \Delta f$, где k – коэффициент крутизны характеристики ЧД, задаваемой масштабом выбранной частоты f_0 . При изменении крутизны спада и подъема АЧХ на ± 12 дБ/окт крутизна характеристики ЧД увеличивается в 2 раза.

Расстроенные контуры с АЧХ, где крутизна спада и подъема соответствует значению ± 6 дБ/окт, представляют собой фильтры первого порядка. Расстроенные контуры с АЧХ, где крутизна спада и подъема соответствует значению ± 12 дБ/окт, представляют собой фильтры второго порядка, состоящие из двух последовательно соединенных фильтров первого порядка.

Достоинства ЧД реализованного на двух расстроенных контурах:

- фильтры и АД можно реализовать на базе быстродействующих операционных усилителях, что позволит точно реализовать спад и подъем АЧХ, существенно снизить влияние температуры на точность характеристики ЧД;

- за счет использования УВХ, требования к АЦП в плане быстродействия существенно снижаются;

- легко производить настройку характеристики ЧД, путем подачи сигнала разной частоты с генератора произвольной формы;

- возможность работы со сверхкороткими импульсами $\tau_{и} < 50$ нс.

Недостатки ЧД реализованного на двух расстроенных контурах:

- низкая крутизна характеристики ЧД, следовательно, дольше осуществляется переходный процесс установки частоты;

- необходимо масштабировать входной сигнал с частотой Δf до определенного уровня мощности, при котором будет осуществляться линейное детектирование на выходе АД;

- крутизна характеристики ЧД зависит от мощности входного сигнала.

3. Анализ квадратурного АЧД

Квадратурный цифровой АЧД является одним из видов ЧД, основанного на использовании алгоритма автокорреляционной обработки, который способен

обеспечивать высокую точность и быстродействие определения частоты в широком частотном диапазоне [5, 6].

Алгоритм определения частоты квадратурного АЧД с помощью функции арктангенса и производной по времени t изображен на рис. 6.

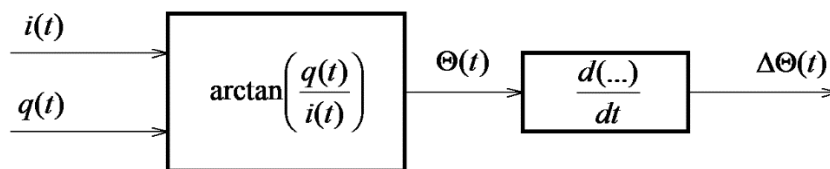


Рис. 6. Алгоритм работы квадратурного АЧД

Операцию арктангенса сложно реализовать без значительных вычислительных ресурсов, поэтому можно исключить операцию вычисления промежуточного значения фазы, как показано в выражении ниже:

$$\Delta\Theta(t) = \frac{d\{\arctan[r(t)]\}}{dt} = \frac{1}{1+r^2(t)} \frac{d[r(t)]}{dt}, \quad (6)$$

где $r(t) = \frac{q(t)}{i(t)}$, $i(t)$, $q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющая приемника.

Вычисляя производную, получим:

$$\frac{d[r(t)]}{dt} = \frac{d[q(t)/i(t)]}{dt} = \frac{i(t) \frac{d[q(t)]}{dt} - q(t) \frac{d[i(t)]}{dt}}{i^2(t)}. \quad (7)$$

Выходной сигнал АЧД $\Delta\Theta$, с учетом (6) и (7) определяется выражением:

$$\Delta\Theta(t) = \frac{1}{1+r^2(t)} \frac{i(t) \frac{d[q(t)]}{dt} - q(t) \frac{d[i(t)]}{dt}}{i^2(t)} = \frac{i(t) \frac{d[q(t)]}{dt} - q(t) \frac{d[i(t)]}{dt}}{i^2(t) + q^2(t)}. \quad (8)$$

Для дискретного определения $\Delta\Theta(n)$, можно ввести в систему АЧД программную задержку Z^{-N} , а также заменить непрерывную функцию дифференцирования дискретным дифференцирующим фильтром первого порядка.

Один из вариантов реализации цифрового квадратурного АЧД показан на рис. 7.

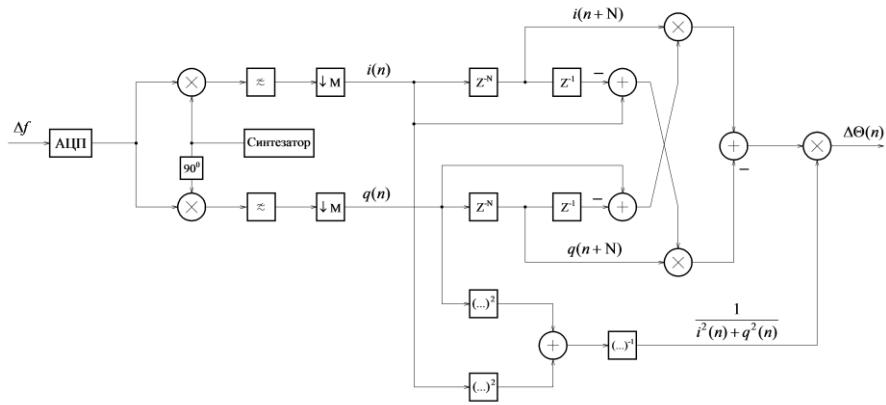


Рис. 7. Структурная схема квадратурного АЧД

Цифровой квадратурный АЧД работает следующим образом. На вход АЦП поступает сигнал с разностной частотой Δf , с помощью квадратурной схемы цифровая обработка переносится на нулевую частоту. Цифровыми блоками $\downarrow M$ производится децимация сигналов $i(n)$ и $q(n)$.

Характеристика АЧД $\Delta\Theta(n)$ с учетом (8), определяется следующим выражением:

$$\Delta\Theta(n) = \frac{i(n+N)(q(n) - q(n+N+1)) - q(n+N)(i(n) - i(n+N+1))}{i^2(n) + q^2(n)}, \quad (9)$$

где N – групповая задержка сигнала.

График зависимости $\Delta\Theta(n)$ от Δf квадратурного АЧД, с разной частотой дискретизации $f_d = 80, 40, 20$ МГц ($M = 1, 2, 4$) и групповой задержкой сигнала $Z^{-N} = Z^{-1}, Z^{-2}, Z^{-4}, Z^{-8}, Z^{-10}$ показан на рис. 8.

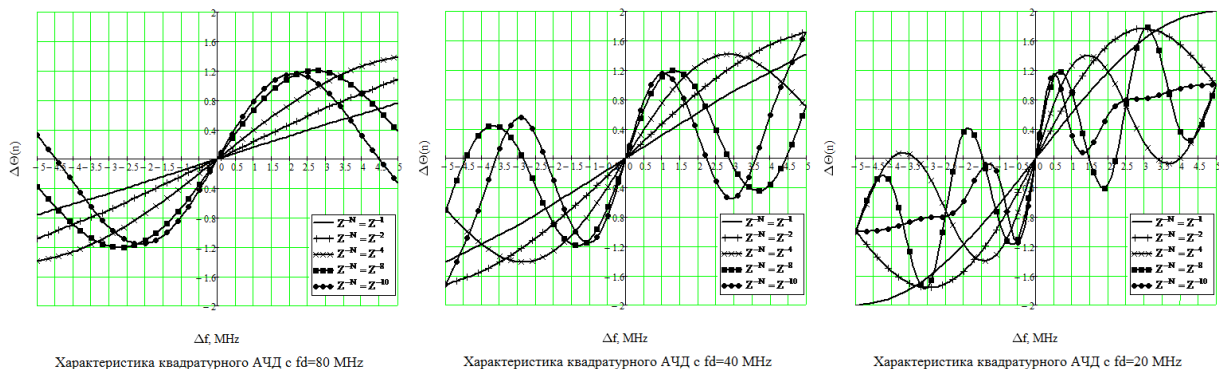


Рис. 8. График зависимости $\Delta\Theta(n)$ от Δf квадратурного АЧД

Как видно из рис. 8, крутизна характеристики ЧД увеличивается с уменьшением частоты дискретизации и увеличением групповой задержки

сигнала, при этом значительно сокращается диапазон изменения частоты Δf . Оптимальный вариант характеристики ЧД, которую можно линейаризовать на частоте $\Delta f = \pm 5$ МГц, соответствует частоте дискретизации $f_d = 20$ МГц ($M=4$) и задержке $Z^{-N} = Z^{-1}$.

Достоинства цифрового квадратурного АЧД:

- легко реализовывается программными методами;
- не требует аппаратной настройки, только программной;
- высокая крутизна характеристики ЧД;
- высокая точность установки частоты;
- характеристика ЧД инвариантна к мощности входного сигнала с частотой

Δf , поскольку осуществляется нормировка сигнала $\Delta\Theta(n)$.

Недостатки цифрового квадратурного АЧД:

- узкий диапазон входных частот;
- частота дискретизации ограничена быстродействием АЦП;
- большое влияние оказывают шумы на крайних положениях

характеристики $\Delta\Theta(n)$, при стремлении характеристики $\Delta\Theta(n)$ к нулю влияние шумов снижается.

4. Моделирование работы цифровой АПЧ

Для оценки переходного процесса установки частоты цифровой АПЧ была реализована имитационная модель цифровой АПЧ, где в качестве ЧД использовался принцип расстроенных контуров, а также квадратурный АЧД. Блок-схема модели изображена на рис. 9.

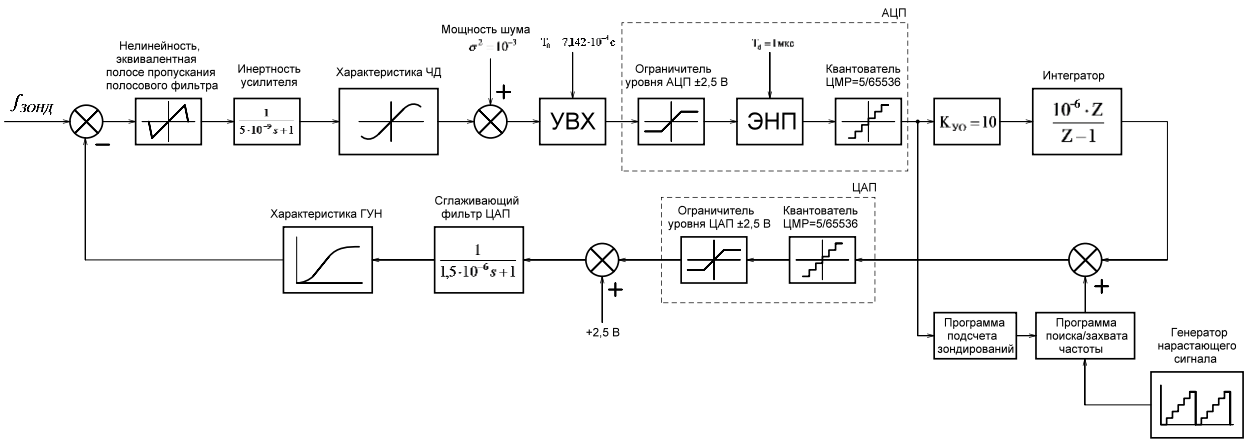


Рис. 9. Блок-схема модели цифровой АПЧ

В качестве зондирующего сигнала $f_{\text{зонд}}$ выступает постоянный уровень сигнала, значение которого соответствует значению частоты $f_{\text{зонд}} = 9350 \pm 30$ МГц. В качестве полосового фильтра выступает нелинейность, которая эквивалентна фильтру с полосой 10 МГц. Характеристика ЧД подобрана таким образом, чтобы нулевое значение $\Delta\Theta(n)$ соответствовало значению установившейся частоты $f_0 = 30$ МГц. Характеристика ЧД на расстроенных контурах с крутизной ± 6 дБ/окт, ± 12 дБ/окт и АЧД с $f_d = 20$ МГц, $Z^{-N} = Z^{-1}$ показана на рис. 10.

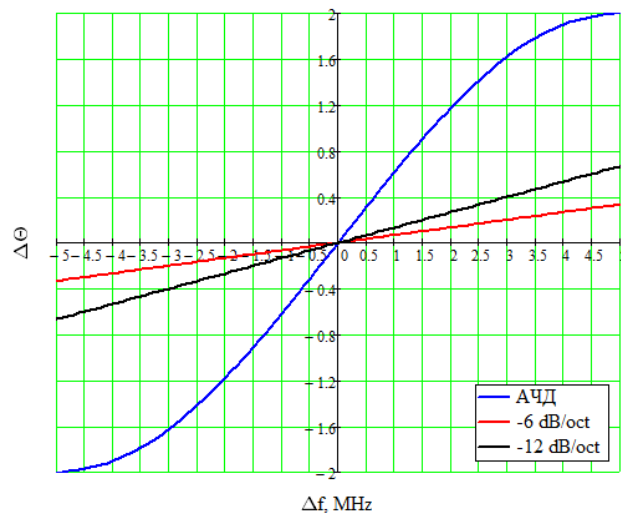


Рис. 10. Характеристики ЧД

Перед УВХ добавлен шум (нормальное распределение), мощность которого соответствует значению $\sigma^2 = 10^{-3}$. Поскольку характеристика $\Delta\Theta(n)$ АЧД в зависимости от Δf изменяет мощность шума σ^2 , в схему модели с АЧД

добавлена зависимость изменения мощности шума перед УВХ. На рис. 11 приведена расчетная зависимость изменения мощности шума σ^2 от $\Delta\Theta(n)$.

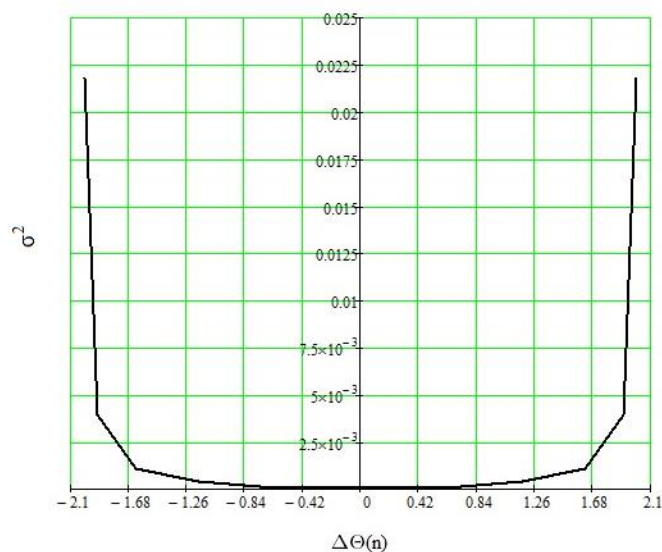


Рис. 11. Зависимость изменения мощности шума σ^2 от $\Delta\Theta(n)$

УВХ тактируется с периодом $T_0 = 7,142 \cdot 10^{-4}$ с, равным периоду зондирования. АЦП, ЦАП тактируется с периодом $T_d = 1$ мкс. Нелинейная характеристика ГУН приведена на рис. 12.

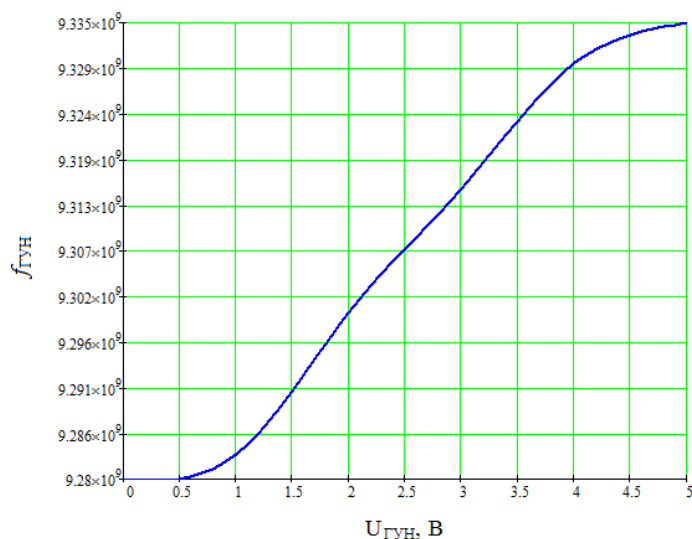


Рис. 12. Нелинейная характеристика ГУН

Переходный процесс установки разностной частоты $\Delta f = 35$ МГц до установившейся частоты $f_0 = 30$ МГц показан на рис. 13 (в). Переходный процесс установки $\Delta\Theta(t)$ с аддитивным шумом и $\Delta\Theta(n)$ после УВХ показан на рис. 13 (а, б).

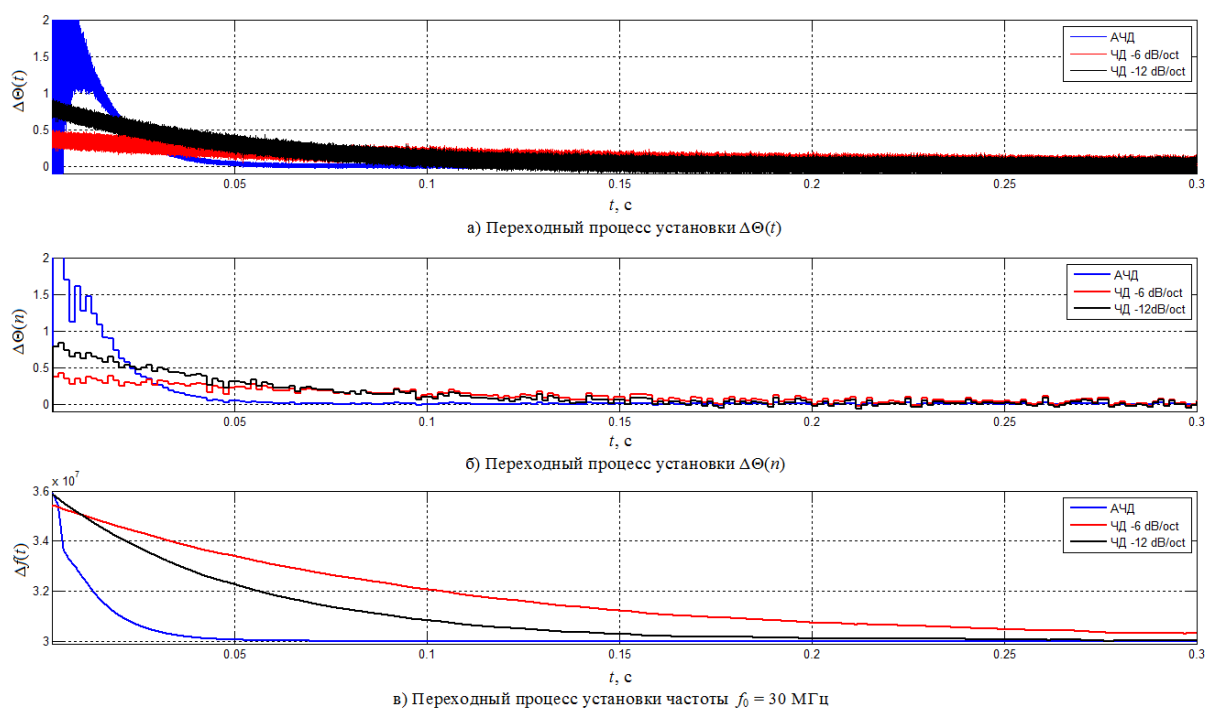


Рис. 13. Переходный процесс установки частоты

Длительность переходного процесса установки частоты цифровой системы АПЧ (см. рис. 13 (в)) с использованием АЧД составляет 60 мс, при использовании ЧД на расстроенных контурах с крутизной ± 6 дБ/окт, ± 12 дБ/окт, длительность переходного процесса возрастает более чем в 5 раз.

Как видно из рис. 13 (а) в начале переходного процесса мощность шума АЧД значительно превышает значение шума ЧД на расстроенных контурах, но после идет снижение мощности шума. На рис. 13 (б) видно, как переходный процесс установки $\Delta\Theta(n)$ АЧД из-за значительного влияния шума теряет монотонность, которую компенсирует интегратор, вносящий астатизм в систему управления подстройкой частоты.

Среднеквадратическая погрешность установки частоты f_0 цифровой АПЧ с АЧД составляет 2234 Гц, для ЧД с крутизной ± 6 дБ/окт погрешность составляет 14242 Гц, для ЧД с крутизной ± 12 дБ/окт погрешность составляет 12540 Гц. Плотность вероятности отклонения установившейся частоты f_0 с высокой точностью подчиняется нормальному распределению. На рис. 14 показана плотность вероятности отклонения установившейся частоты f_0 для разных ЧД.

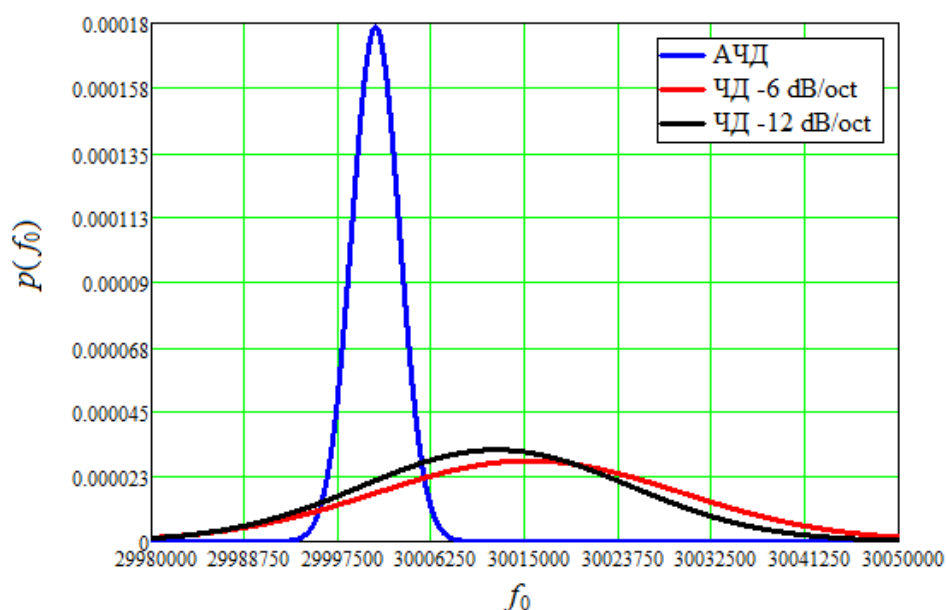


Рис. 14. Плотность вероятности отклонения частоты f_0

Наиболее точно и с минимальным переходным процессом подстраивает частоту система цифровой АПЧ с квадратурным АЧД, единственный минус АЧД является сильная зависимость от мощности шума в крайних положениях характеристики $\Delta\Theta(n)$, компенсировать данный недостаток можно уменьшив полосу пропускания полосового фильтра для разностной частоты Δf .

Заключение

Результаты анализа работы цифровой системы АПЧ гетеродина под несущую частоту импульсного магнетронного передатчика позволяют сделать вывод, что основным элементом, отвечающим за точность и скорость подстройки частоты, является ЧД.

Исследован принцип работы ЧД на расстроенных контурах с крутизной ± 6 дБ/окт, ± 12 дБ/окт, а также цифровой квадратурный АЧД. У обоих видов ЧД имеются достоинства и недостатки. ЧД на расстроенных контурах имеет преимущество над АЧД – это возможность работы с широкой полосой пропускания частоты Δf , а также возможность работы со сверхкороткими зондирующими импульсами $\tau_{\text{и}} < 50$ нс. Цифровой квадратурный АЧД имеет преимущество над ЧД на расстроенных контурах – это высокая точность,

меньшая длительность переходного процесса установки частоты, характеристика ЧД инвариантна к мощности входного сигнала, простота реализации.

Моделирование работы цифровой АПЧ подтверждает вышеуказанные достоинства и недостатки ЧД двух видов.

Литература

1. Ли. И. Магнетроны импульсного действия – все дело в катоде. *Электроника*. 2012. №5 С.84-88.
2. Мыценко И.М., Халамейда Д.Д. Система автоматической подстройки частоты гетеродина приемника радиолокационной станции с магнетронным передатчиком. *Радіофізика та електроніка*. 2018. Т.23. №2. С.48-53. <https://doi.org/10.15407/rej2018.02.048>
3. Чурюмов Г.И., Экезли А.И. Моделирование частотных характеристик магнетрона с двумя выводами энергии. *Прикладная электроника*. 2012. Т.11. №1. С.63-71.
4. Каганов В.И. *Радиоэлектронные системы автоматического управления*. Москва, Горячая линия – Телеком. 2009. 432 с.
5. Дятлов А.П., Кочерга А.В. Анализ автокорреляционного частотного дискриминатора при оценивании частоты составных фазоманипулированных сигналов. *Известия ТРТУ*. 1995. №1. С.3-6.
6. Schnyder F., Haller C. *Implementation of FM Demodulator Algorithms on a High Performance Digital Signal Processor*. PhD thesis. Nanyang Technological University. 2002. 154 p. URL: <https://www.veron.nl/wpcontent/uploads/2014/01/FmDemodulator.pdf>

Для цитирования:

Чухломин И.Е., Трубников А.В., Лашкевич Г.Ю. Анализ цифровой системы автоматической подстройки частоты гетеродина приемника под несущую частоту импульсного магнетронного передатчика. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.10>)