

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни
«Радіоавтоматика»
для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка» усіх форм навчання
Частина I

2021

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Радіоавтоматика” для студентів спеціальності 172 “Телекомунікації та радіотехніка” усіх форм навчання. Частина I / Укл. В.С. Кабак, Г.М. Сидоренко. – Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2021. – 75 с.

Укладачі: В.С. Кабак, доцент, к.т.н. кафедри РТТ
Г.С. Сидоренко, зав. лаб. кафедри РТТ

Рецензент: С.В. Морщавка, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск: В.С. Кабак, доцент, к.т.н. кафедри РТТ

Затверджено:
на засіданні кафедри
радіотехніки та телекомунікацій
Протокол № 5 від 2.02.2021 р.

Рекомендовано до видання НМК
факультету радіоелектроніки та
телекомунікацій
Протокол № 5 від 21.02.2021 р.

ЗМІСТ

1	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ	5
1.1	Мета роботи	5
1.2	Прилади, що використовуються в роботі.....	5
1.3	Підготовка до роботи	5
1.4	Загальні відомості.....	6
1.5	Застосування ЧАП для стабілізації проміжної частоти.....	7
1.6	Опис стенду.....	9
1.6.1	Функціональна схема стенду.....	9
1.6.2	Принципова схема стенду	14
1.7	Експериментальна частина.....	22
1.8	Контрольні запитання	30
1.9	Література	31
2	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ АВТОПІДСТРОЙКИ.....	32
2.1	Мета роботи	32
2.2	Прилади, що використовуються в роботі.....	32
2.3	Підготовка до роботи	32
2.4	Загальні відомості.....	32
2.5	Опис стенду.....	36
2.6	Експериментальна частина.....	38
2.7	Контрольні запитання	41
2.8	Література	41
3	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АРП	42
3.1	Мета роботи	42
3.2	Прилади, що використовуються в роботі.....	42
3.3	Підготовка до роботи	42
3.4	Загальні відомості.....	43
3.5	Опис стенду.....	45
3.6	Дослідницька частина	46
3.7	Контрольні запитання	47
4	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ	48
4.1	Мета роботи	48
4.2	Прилади, що використовуються в роботі.....	48

4.3 Підготовка до роботи	48
4.4 Загальні відомості.....	48
4.5 Застосування ЧАП для стабілізації проміжної частоти.....	51
4.6 Опис стенду.....	53
4.7 Експериментальна частина.....	67
4.8 Контрольні запитання	74
4.9 Література	75

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ

1.1 Мета роботи

Закріпити знання з розділу курсу "Системи частотного автопідстроювання", експериментально дослідити вплив параметрів функціонально необхідних вузлів ЧАП на якість роботи системи, дослідити роботу ЧАП в режимах утримання і захоплення системи, різні варіанти реалізації астатичних систем ЧАП.

1.2 Прилади, що використовуються в роботі

1. Осцилограф СІ-74 для візуального контролю форми вихідного сигналу тракту проміжної частоти.
2. Генератор ГЗ-112 – джерело вхідного сигналу гармонічної форми
3. Вольтметр ВУ-15 – для вимірювання напруги постійного і змінного струму.

1.3 Підготовка до роботи

1. Вивчити розділ курсу "Системи частотного автопідстроювання".
2. Ознайомитись зі схемою й конструкцією стенда для даної роботи.
3. Зобразити якісно основні характеристики системи ЧАП.

1.4 Загальні відомості

У загальному випадку принцип дії існуючих систем автопідстроювання частоти (АПЧ) заснований на автоматичному вимірюванні відхилення частоти генератора, що керується напругою (ГКН) від деякого номінального (або еталонного) значення і підстроюванні цього генератора таким чином, щоб таке відхилення не перевищувало заданої величини.

Будь-яка система АПЧ окрім ГКН повинна до свого складу включати вимірювальний елемент (вимірювач розузгодження), який визначає відхилення частоти генератора від еталонного значення і керуючий елемент, що забезпечує необхідну зміну частоти ГКН.

В системах частотного автопідстроювання (ЧАП) вимірювачем розузгодження виступає частотний дискримінатор, напруга на виході якого $U_{\text{вихд}}$ залежить від відхилення частоти вхідного сигналу від деякої частоти, яка отримала назву перехідної частоти дискримінатора.

Якість системи ЧАП як системи регулювання характеризують декількома показниками. Серед основних характеристик ЧАП необхідно розглянути точність роботи, стійкість, динамічні показники якості, а також характеристики, які визначаються нелінійними властивостями ЧАП – смуга утримання частоти і смуга захоплення частоти.

Ефективність роботи системи ЧАП в лінійному режимі звичайно оцінюється відношенням величини початкового розладу (помилки) $\Delta f_{\text{поч}}$ до остаточної помилки в усталеному режимі роботи $\Delta f_{\text{ост}}$. Це відношення прийнято називати коефіцієнтом авторегулювання або автопідстроювання [1, 2]:

$$K_{\text{АПЧ}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{ост}}} . \quad (1.1)$$

Значення коефіцієнта автопідстроювання в статичних системах ЧАП звичайно коливається у межах 30...50. Для деяких спеціальних пристроїв високої точності шляхом ускладнення схеми вдається досягнути значення цієї величини до декілька сотень.

Смуга захоплення визначає діапазон припустимих початкових розладів частоти сигналу, в межах якого система ЧАП нормально функціонує після включення технічного пристрою.

Смуга утримання визначається як максимально припустима величина власної помилки автогенератора за частотою в усталеному режимі. Смуга утримання характеризує діапазон розстроїв частоти сигналу в межах якого під час повільної зміни частоти вхідного сигналу режим стеження зберігається, якщо система вже була введена у цей режим до цього [1,2,3]. Іншими словами, смуга утримання трактується, як максимальна величина частотного розладу, яка може бути скомпенсована системою ЧАПЧ. Як правило смуга утримання більша за смугу захоплення.

За показниками якості перехідного процесу аналізується процес установлення частоти автогенератора, що стабілізується після включення системи ЧАП або зміни частоти коливань еталонного генератора. Звичайно цей процес має аперіодичний або затухаючий характер.

Стійкість роботи системи ЧАП визначається декількома параметрами. Оскільки система ЧАП з управлінням за помилкою представляє систему із замкненим контуром регулювання, тобто з від'ємним зворотним зв'язком, то в ній подібно до автогенератора можуть виникнути власні автоколивання, якщо будуть виконані умови балансу фаз і амплітуд. Такий режим роботи є неприпустимим в системі ЧАП, яка повинна відслідковувати зміни частоти вхідного сигналу, а не утворювати власні коливання.

1.5 Застосування ЧАП для стабілізації проміжної частоти

Функціональна схема супергетеродинного приймача з використанням ЧАП для стабілізації проміжної частоти наведена на рис. 1.1.

На один з входів змішувача (ЗМ) надходить вхідний сигнал – напруга $u_c(t)$ з частотою ω_c . На другий вхід ЗМ подається напруга u_r генератора, що керується напругою (ГКН) з частотою ω_r . На виході ЗМ утворюється напруга проміжної частоти $\omega_{пр} = \omega_c - \omega_r$, яка через підсилювач проміжної частоти (ППЧ) подається до входу частотного дискримінатора (ЧД). На виході ЧД формується напруга $U_{чд}$,

пропорційна відхиленню (помилці регулювання) $\Delta\omega_{\text{пр}}$ миттєвого значення проміжної частоти $\omega_{\text{пр}}$ від її номінального значення $\omega_{\text{пр}0}$ як за величиною, так і за знаком: $u_{\text{чд}}(t) = K_{\text{чд}} \Delta\omega_{\text{пр}}(t)$, де $\Delta\omega_{\text{пр}}(t) = \omega_{\text{пр}}(t) - \omega_{\text{пр}0}(t)$, $K_{\text{чд}}$ – коефіцієнт передачі (перетворення) ЧД. Знак напруги $u_{\text{чд}}(t)$ відповідає знаку відхилення $\Delta\omega_{\text{пр}}(t)$.

Напруга $u_{\text{чд}}(t)$ проходить через фільтр нижніх частот (ФНЧ) і подається до керуючого елементу (КЕ) генератора, що керується (ПГ). В результаті змінюється частота $\omega_{\text{г}}$ ПГ таким чином, що $\Delta\omega_{\text{пр}}$ зменшується.

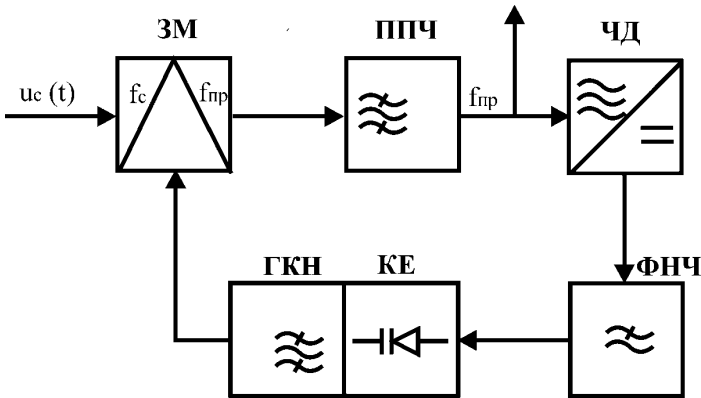


Рисунок 1.1 – Функціональна схема ЧАП для стабілізації проміжної частоти супергетеродинного приймача

Таку систему ЧАП можна розглядати як слідкуючу систему, яка забезпечує зміну частоти $\omega_{\text{г}}$ генератора, що керується у відповідності із законом зміни частоти сигналу $\omega_{\text{с}}$, а також як систему стабілізації проміжної частоти на рівні $\omega_{\text{пр}0}$. В останньому випадку як задавальна дія виступає частота $\omega_{\text{пр}0}$, величиною, що керується – проміжна частота $\omega_{\text{пр}}$, а збуджуючою дією, що викликає відхилення $\Delta\omega_{\text{пр}}$ проміжної частоти $\omega_{\text{пр}}$ від $\omega_{\text{пр}0}$ – зміна частоти $\omega_{\text{с}}$ сигналу, що надходить.

Під час налаштування ГКН можна встановити частоту $\omega_{\text{г}} = \omega_{\text{г}0}$, яка визначається з умови $\omega_{\text{пр}0} = \omega_{\text{с}0} - \omega_{\text{г}0}$, де $\omega_{\text{с}0}$ – середнє (номінальне) значення частоти сигналу, що приймається. Якщо $\omega_{\text{с}} = \omega_{\text{с}0}$, то проміжна

частота на виході змішувача $\omega_{\text{пр}} = \omega_{\text{с0}} - \omega_{\text{г0}} = \omega_{\text{пр0}}$, тобто проміжна частота точно рівняється частоті настроювання (перехідній) частоті ЧД, $\Delta\omega_{\text{пр}} = 0$ і тому на виході ЧД напруга $u_{\text{ЧД}}(t) = 0$. Система знаходиться у стані рівноваги. Під час відхилення $\omega_{\text{с}}$, тобто якщо $\omega_{\text{с}} = \omega_{\text{с0}} + \Delta\omega_{\text{с}}$ виникає зміна проміжної частоти на величину $\Delta\omega_{\text{с}}$, оскільки $\omega_{\text{пр}} = \omega_{\text{пр0}} + \Delta\omega_{\text{с}}$. Для схеми вимірювача розузгодження (ЧД) це означає, що виникає розузгодження $\Delta\omega_{\text{пр}} = \omega_{\text{пр0}} - [\omega_{\text{пр0}} + \Delta\omega_{\text{с}}] = -\Delta\omega_{\text{с}}$, тобто в момент зміни $\omega_{\text{с}}$ помилка системи складає $\Delta\omega_{\text{пр}} = -\Delta\omega_{\text{с}}$. За допомогою ЧД ця помилка $\Delta\omega_{\text{пр}}$ перетворюється у напругу $u_{\text{ЧД}}$, яка фільтрується і як напруга управління $u_{\text{у}}$ надходить до керуючого елемента ГКН. Під впливом $u_{\text{у}}$ частота ГКН змінюється на величину $\Delta\omega_{\text{г}}$: $\omega_{\text{г}} = \omega_{\text{г0}} + \Delta\omega_{\text{г}}$. Завдяки цьому проміжна частота $\omega_{\text{пр}}$ на виході ЗМ також змінюється, наближаючись до $\omega_{\text{пр0}}$:

$$\omega_{\text{пр}}(t) = \omega_{\text{с0}} + \Delta\omega_{\text{с}}(t) - [\omega_{\text{г0}} + \Delta\omega_{\text{г}}(t)] = \omega_{\text{пр0}} + [\Delta\omega_{\text{с}}(t) - \Delta\omega_{\text{г}}(t)].$$

Дійсно, якщо до надходження $u_{\text{у}}$ до ГКН $\Delta\omega_{\text{пр}} = \Delta\omega_{\text{с}}$, то після надходження $u_{\text{у}}$ значення частотного розладу стане $\Delta\omega_{\text{пр}} = \Delta\omega_{\text{с}} - \Delta\omega_{\text{г}}$, тобто відхилення зменшилось на величину $\Delta\omega_{\text{г}}$. Оскільки в системі, що розглядається застосовується принцип управління за помилкою, то управляюча дія $u_{\text{у}}$ формується з помилки системи $\Delta\omega_{\text{пр}}$, і, як наслідок, повністю усунути помилку неможливо [3].

Як підсумок, можна відзначити, що безпосередньо до складу ЧАП входять частотний дискримінатор (ЧД), що виконує функцію вимірювача розузгодження, фільтр нижніх частот (ФНЧ) і керуючий елемент (КЕ). Змішувач, підсилювач проміжної частоти і сам гетеродин є типовими елементами класичної схеми супергетеродинного приймача з одноразовим перетворенням частоти.

1.6 Опис стенду

1.6.1 Функціональна схема стенду

На рис. 1.2 наведена функціональна схема лабораторного стенду для дослідження системи частотного автопідстроювання і ЧАП. У стенді пропонується дослідити варіант застосування ЧАП для стабілізації проміжної частоти супергетеродинного приймача.

Тракт супергетеродина з одноразовим перетворенням частоти реалізовано за допомогою змішувача ЗМ, гетеродина (генератор, що керується напругою) ГКН і підсилювача проміжної частоти, який в стенді реалізовано у вигляді двох підсилювачів ППЧ1 і ППЧ2.

Частотне автопідстроювання в схемі реалізується за допомогою частотного дискримінатора ЧД_{пр}, перехідна частота якого обирається рівною центральній частоті смуги пропускання тракту проміжної частоти, фільтра нижніх частот ФНЧ і керуючого елементу КЕ, в якості якого використовується варикап, підключений до контуру гетеродина ГКН.

Для запобігання впливу вимірювальних приладів на результати дослідження, вимірювання миттєвого значення проміжної частоти і частоти гетеродина пропонується проводити за допомогою буферних каскадів які реалізовані як витікові повторювачі (ВП) на польовому транзисторі і однокаскадного підсилювача радіочастоти.

Вихідна напруга частотного дискримінатора, яка може бути виміряна за допомогою гнізда Х2, надходить до основного ФНЧ1 системи ЧАП. Відфільтрований сигнал помилки через ряд буферних і підсилювальних каскадів, вибір яких проводиться перемикачем SA1, надходить до керуючого елемента як напруга управління системи регулювання.

В схемі стенда передбачено проведення ряду експериментів для дослідження характеристик ЧАП.

По-перше, з метою оперативності проведення досліджень в стенд вбудовано цифровий частотомір на базі мікропроцесора PIC1684. Відповідно, за допомогою перемикача SA2 можливе безпосереднє вимірювання частоти вхідного сигналу, частоти гетеродина і миттєвого значення проміжної частоти на виході селективної системи тракту ПЧ.

За допомогою перемикача SA1 проводиться вибір експерименту для визначення основних характеристик систем.

У першому положенні SA1 коло зворотного зв'язку системи ЧАП розімкнено і дослідженню підлягає статична детекторна характеристика ЧД. Також в цьому положенні проводиться вимірювання наскрізної частотної характеристики змішувача і ППЧ по основному каналу прийому для розімкненої системи ЧАП.

В другому положенні перемикача SA1 коло зворотного зв'язку замикається і вихідна напруга частотного дискримінатора безпосередньо надходить до ФНЧ1 системи ЧАП, тобто, контур регулювання замикається і система набуває класичного вигляду статичної системи ЧАП (з астатизмом нульового порядку). Буферні каскади після ФНЧ не змінюють коефіцієнт передачі по контуру регулювання, оскільки коефіцієнт передачі з напруги цих каскадів рівняється одиниці, необхідність їх включення пояснюється проведенням експериментів для інших положень перемикача.

Утворений на виході ФНЧ сигнал через буферні каскади і суматор як напруга управління поступає до керуючого елементу ЧАП. Для вимірювання остаточного розстроювання проміжної частоти відносно номінального у замкненому стані ЧАП (це і є наскрізна характеристика системи стабілізації проміжної частоти):

$$\Delta f_{\text{ост}} = F(\Delta f_{\text{вх}})$$

необхідно змінюючи частоту ГЗ-112 як у бік більших значень частоти відносно номінального значення частоти основного каналу f_{c0} , так і у бік менших значень провести вимірювання наскрізної характеристики системи ЧАП.

Через гістерезисні властивості систему ЧАП частоту вимірювального генератора необхідно спочатку змінювати від малих значень розладів відносно частоти основного каналу у бік великих розладів, а потім навпаки повертатися від великих частотних розладів

до малих. Границі зміни частоти обрати такими, щоб отримати необхідні дані для визначення смуги захоплення і смуги утримання.

В третьому стані перемикача SA1 досліджується вплив коефіцієнта передачі по контуру регулювання на основні характеристики ЧАП. Так, в третьому положенні перемикача SA2 коло зворотного зв'язку також замкнено, але вихідна напруга частотного дискримінатора після фільтрації в ФНЧ1 підсилюється за допомогою підсилювача постійного струму ППС1. Фільтр кільця ЧАП залишається той же самий, що і другому положенні SA2. Додатковий ППС1 збільшує загальний коефіцієнт передачі по контуру регулювання і дозволяє дослідити характеристики системи ЧАП аналогічно попередньому пункту (коефіцієнт автопідстроювання, смуги захвату і утримання) для збільшеного значення загального коефіцієнта передачі по контуру K.

В четвертому положенні перемикача SA1 коло зворотного зв'язку також замкнено, і функціональна схема такого варіанту ЧАП тотожна класичній статичній ЧАП, яка досліджується у попередньому випадку.

Але замість одноланкового RC- фільтра першого порядку в коло регулювання включається трьохланковий ФНЧ, що суттєво збільшує фазовий набіг у колі зворотного зв'язку. Відомо, що одноланковий RC-фільтр надає фазовий зсув, який асимптотично устримлюється до -90° , а три послідовно ввімкнені RC-ланки нададуть фазовий зсув, який асимптотично устримлюється до -270° . Таким чином, для кола зворотного зв'язку результуючий фазовий зсув перевищує -180° , тобто виконується умова балансу фаз автогенераторної системи. Для виконання умови балансу амплітуд у цьому положенні перемикача також збільшено коефіцієнт передачі по контуру регулювання за допомогою додаткового підсилювача постійного струму ППС2.

Таким чином, включення до контуру регулювання багатоланкового RC-фільтра і ППС2 дозволяє дослідити ЧАП в режимі самозбудження. Під час самозбудження системи ЧАП виникає частотна модуляція напруги проміжної частоти. На виході ППЧ коливання з частотною модуляцією через наявність резонансних контурів перетворюються в коливання з амплітудно-частотною модуляцією. Амплітудна модуляція дозволяє за допомогою осцилографа, підключеного до виходу ППЧ проконтролювати режим системи ЧАП.

В п'ятому положенні перемикача SA1 досліджується система ЧАП з астатизмом першого порядку. Як відомо, для системи з регулюванням за помилкою, астатизму першого порядку можливо досягнути, якщо в контур регулювання включити інтегратор сигналу помилки. Тому введення ідеального інтегратора до контуру регулювання послідовно з ФНЧ дозволить реалізувати систему ЧАП з астатизмом першого порядку. Для такої системи помилка регулювання для задаючої дії у вигляді константи буде рівнятися 0, а для задаючої дії у вигляді лінійної функції часу матиме кінцеве значення.

1.6.2 Принципова схема стенду

Приймальний тракт супергетеродинного приймача реалізовано на базі мікросхеми K174XA2, яка представляє собою ІМС 3-го ступеню інтеграції і містить 34 транзистора, 21 діод і 57 резисторів. Електричні параметри ІМС K174XA2 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Електричні параметри ІМС K174XA2

Номінальна напруга живлення	9В
Струм живлення при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не більше	16мА
Відношення сигнал-шум при $U_{жив} = 9В$, $f_{вх} = 1 МГц$, $U_{BX} = 10мкВ$, $m = 0,8$, $T = +25^{\circ}C$, не більше	24дБ
Вихідна напруга низької частоти при $U_{жив} = 9В$, $f_{вх} = 1 МГц$, $f_{пч} = 465кГц$, $f_m = 1 кГц$, $m = 0,8$, $T = +25^{\circ}C$: при $U_{BX} = 20мкВ$, не менш при $U_{BX} = 5 \cdot 10^5 мкВ$	60мВ 100...560мВ
Зміна вихідної напруги низької частоти при зміні напруги джерела живлення в діапазоні 4,8...9В при $f = 1 МГц$, $f_m = 1 кГц$, $m = 0,3$, $U_{BX} = 10мкВ$, $T = +25^{\circ}C$, не більше	6дБ
Максимальне значення частоти вхідного сигналу при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не менш	27МГц
Коефіцієнт гармонік при $U_{жив} = 9В$, $f_{вх} = 1МГц$, $f_{пч} = 465 кГц$, $f_m = 1кГц$, $m = 0,8$, $T = +25^{\circ}C$, не більш: при $U_{BX} = 5 \cdot 10^5 мкВ$ при $U_{BX} = 3 \cdot 10^4 мкВ$	10% 8%

Продовження таблиці 1.1

Вхідний опір ППЧ при $U_{жив} = 9В, T = +25^{\circ}C$, не менш	3кОм
Вхідний опір ПРЧ при $U_{жив} = 9В, T = +25^{\circ}C$, не менш	3кОм
Вихідний опір ППЧ при $U_{жив} = 9В, T = +25^{\circ}C$, не менш	30кОм

З технічних даних випливає, що ІМС К174ХА2 призначена для реалізації радіочастотного тракту супергетеродинного приймача і дозволяє реалізувати прийом радіостанцій з амплітудною модуляцією з максимальним значенням частоти вхідного сигналу до 30 МГц.

Ця мікросхема містить такі функціональні вузли: підсилювач радіочастоти, балансний змішувач, гетеродин і підсилювач проміжної частоти з системою автоматичного регулювання підсилення. Функціональна схема мікросхеми і типова схема підключення зображені на рис. 1.2.

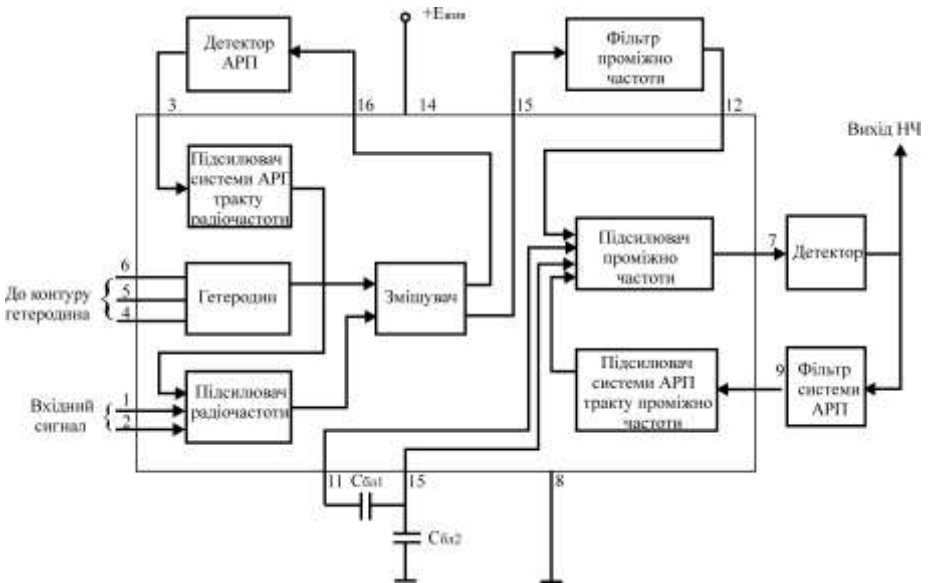


Рисунок 1.2 – Функціональна схема супергетеродина а базі ІМС 174ХА2

Оскільки мікросхема включає основну частину трактів сигнальної і проміжної частоти, то на її підставі досить легко реалізувати систему ЧАП. Відповідно до рис.1.1 для реалізації ЧАП до схеми приймального тракту достатньо додати частотний дискримінатор ЧД, керуючий елемент КЕ і замкнути коло зворотного зв'язку.

Система ЧАП для стабілізації проміжної частоти в прийमाх радіомовлення, як правило, застосовується в діапазоні УКХ для прийому сигналів з частотною модуляцією зі стандартним значенням проміжної частоти $f_{\text{пр0}}=10,7$ МГц. Але, в лабораторному практикумі як джерело вхідного сигналу використовується вимірювальний генератор ГЗ-112 з максимальною робочою частотою 10 МГц, а максимальна частота вхідного сигналу для 174ХА2 не повинна перевищувати 27 МГц, що не відповідає діапазону УКХ.

Відповідно реалізувати ЧАП в стандартному УКХ діапазоні з таким генератором на базі мікросхеми 174ХА2 не представляється можливим, а реалізація системи частотного автопідстроювання для стандартного значення проміжної частоти $f_{\text{пр}}=465$ кГц, яке характерне для приймачів з амплітудною модуляцією буде неефективним з точки зору проведення експериментів з дослідження ЧАП.

Підсилювач радіочастоти, змішувач і гетеродин мікросхеми К174ХА2 можуть працювати і з більш високочастотними сигналами (80...90 МГц), а підсилювач ПЧ забезпечує достатнє підсилення сигналів тільки у діапазоні до 4...5 МГц.

Тому в схемі стенду пропонується використовувати мікросхему не в типовому режимі зі значенням проміжної частоти $f_{\text{пр}}=465$ кГц, а збільшити значення проміжної частоти приймального тракту до 4,5 МГц. Таке використання мікросхеми цілком можливе для потреб лабораторної роботи.

У такому разі можна застосувати класичну схему ЧАП з типовими варіантами реалізації частотних дискримінаторів, які використовуються, для типових значень проміжної частоти (6,5 МГц або 10,7 МГц.).

Базова функціональна схема системи ЧАП стенду із застосуванням К174ХА2, яка повністю відповідає класичній схемі ЧАП рис.1.1, представлена на рис. 1.3.

З метою розширення функціональних можливостей проведення експериментів з дослідження характеристик ЧАП смугу пропускання

тракту проміжної частоти обрано більшу (≈ 500 кГц) за номінальне значення, яку забезпечують стандартні п'єзокерамічні фільтри. Крім того, обране значення проміжної частоти $f_{\text{пр}} = 4,5$ МГц відрізняється від середнього значення смуги пропускання стандартних фільтрів.

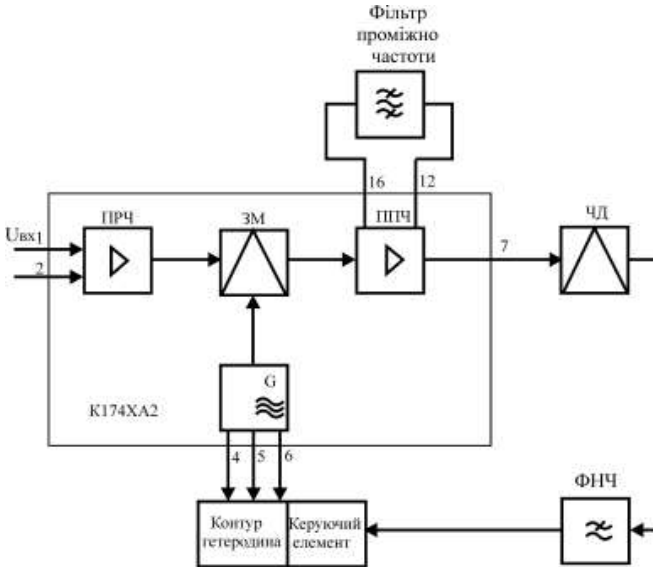


Рисунок 1.3 – Функціональна схема ЧАП на підставі мікросхеми K174XA2

Оскільки для цілей лабораторної роботи питання селективності тракту ПЧ (по сусідньому каналу) не критичне, фільтр проміжної частоти пропонується реалізувати на підставі двох зв'язаних контурів (рис. 1.4).

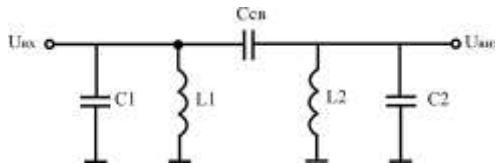


Рисунок 1.4 – Фільтр тракту проміжної частоти

Для частотного дискримінатора пропонується реалізувати схему класичного дробового детектора, як пристрою, який найбільш часто використовувався в схемах радіомовних приймачів (рис. 1.5).

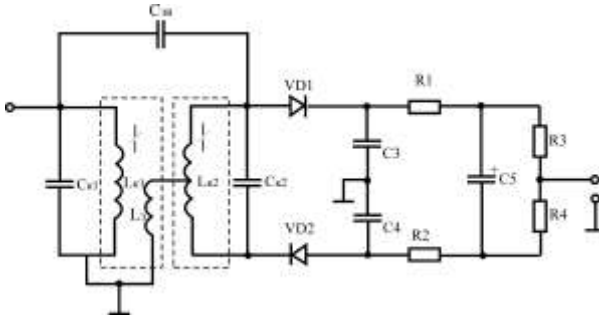


Рисунок 1.5 – Частотний дискримінатор

Постійна складова струму обох діодів протікає по нерозгалуженому колу $VD1$, $L_{к2}$, $VD2$, $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ утворюючи напругу на резисторах $R3$, $R4$. Через велике значення сталої часу кола $R3$, $R4$, $C5$ напруга на ємності $U_{C5}=U_0$ з великим ступенем інерційності зберігається рівною середньому значенню сигналу.

Відповідно, якщо змінюється амплітуда вхідного сигналу, то змінюються кути відсікання струмів і, відповідно, вхідні опори діодних детекторів. Тому амплітудна модуляція придушується через різне шунтування контурів детектора в залежності від амплітуди сигналу.

Так, при збільшенні амплітуди $\cos\theta$ зменшується, кут відсікання струму кожного діода збільшується, вхідні опори діодних детекторів зменшуються і більше шунтують контури перетворювача виду модуляції. І, навпаки, за зменшенням амплітуди вхідного сигналу контури менш шунтуються вхідними опорами діодних детекторів.

Для запобігання можливої перекомпенсації амплітудних змін звичайно підключають резистори з невеликим опором $R1$, $R2$, які не зашунтовані великою ємністю $C5$.

Змінні складові струмів протікають по колам $VD1$, $L_{к2}$, $L3$, $C3$ і $VD2$, $C4$, $L3$, $L_{к2}$, утворюючи на конденсаторах $C3$, $C4$ напруги звукових частот u_{c3} u_{c4} . Під час зміни частоти вхідного сигналу

співвідношення між u_{c1} u_{c2} змінюються, але сумарне значення ($u_{c3}+u_{c4}$) залишається незмінним. Тому цей детектор називають детектором відношень або дробовий детектор.

Вихідна напруга знімається між точками з'єднання C3, C4 і R3, R4 і визначиться як:

$$U=u_{C3}-u_{C4}= u_{C3}-0,5 U_0.$$

Суміщення функцій обмежувача і частотного детектора спрощує схемотехнічну реалізацію, але розділення цих функцій дозволяє отримати більшу якість як обмеження, так і детектування. Особливість схеми дробового детектора стенду порівняно з класичною схемою полягає у реалізації фазозсуваючого трансформатора. Оскільки в транзисторному варіанті з метою досягнення мініатюризації котушки індуктивності L_{k1} , L_3 і L_{k2} виконуються в окремих екранах, то електромагнітний зв'язок між первинним і вторинним контурами фазозсуваючого трансформатора досягається за допомогою конденсатора зв'язку $C_{зв}$ невеликої ємності.

Як основний фільтр нижніх частот контуру регулювання ФНЧ1 (рис. 2.1) використовується звичайний RC-фільтр першого порядку.

Відповідно до функціональної схеми стенду рис. 1.1 для проведення експериментів необхідно реалізувати фрагмент функціональної схеми, який дозволяє змінювати коефіцієнт передачі по контуру регулювання, а також реалізувати операцію інтегрування сигналу помилки (рис. 1.6).

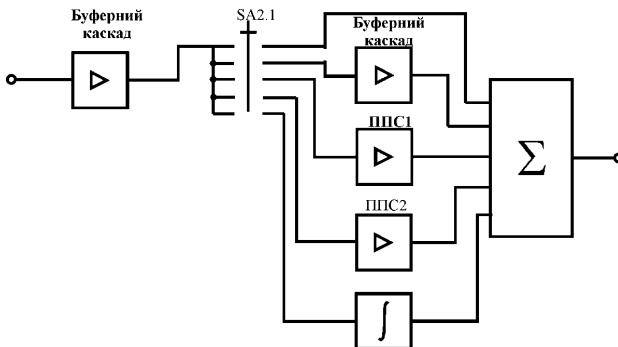


Рисунок 1.6 – Фрагмент функціональної схеми

Операцію інтегрування пропонується реалізувати на базі схеми ідеального інтегратора з використанням операційного підсилювача. Ідеальний інтегратор на ОП реалізується, як правило, для інвертуючого включення ОП (рис. 1.7).

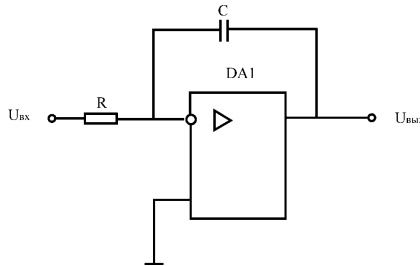


Рисунок 1.7 – Ідеальний інтегратор з використанням ОП

Для того, щоб фаза сигналу помилки не змінювалася порівняно з класичним варіантом ЧАП без інтегратора, перед інтегратором необхідно включити інвертуючий повторювач напруги, який і виконує функцію буферного каскаду відповідно до функціональної схеми рис. 1.1, і рис. 1.6. Тоді принципову схему частини стенду, яка реалізує фрагмент функціональної схеми (рис. 1.6) можна подати у такому вигляді (рис. 1.8).

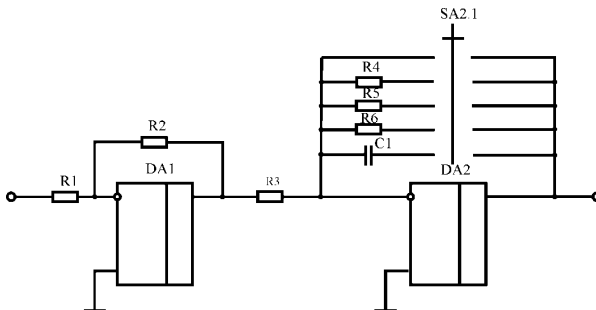


Рисунок 1.8 – Принципова схема тракту сигналу помилки

Повна принципова схема лабораторного стенду для дослідження системи ЧАП зображена на рис.1.9.

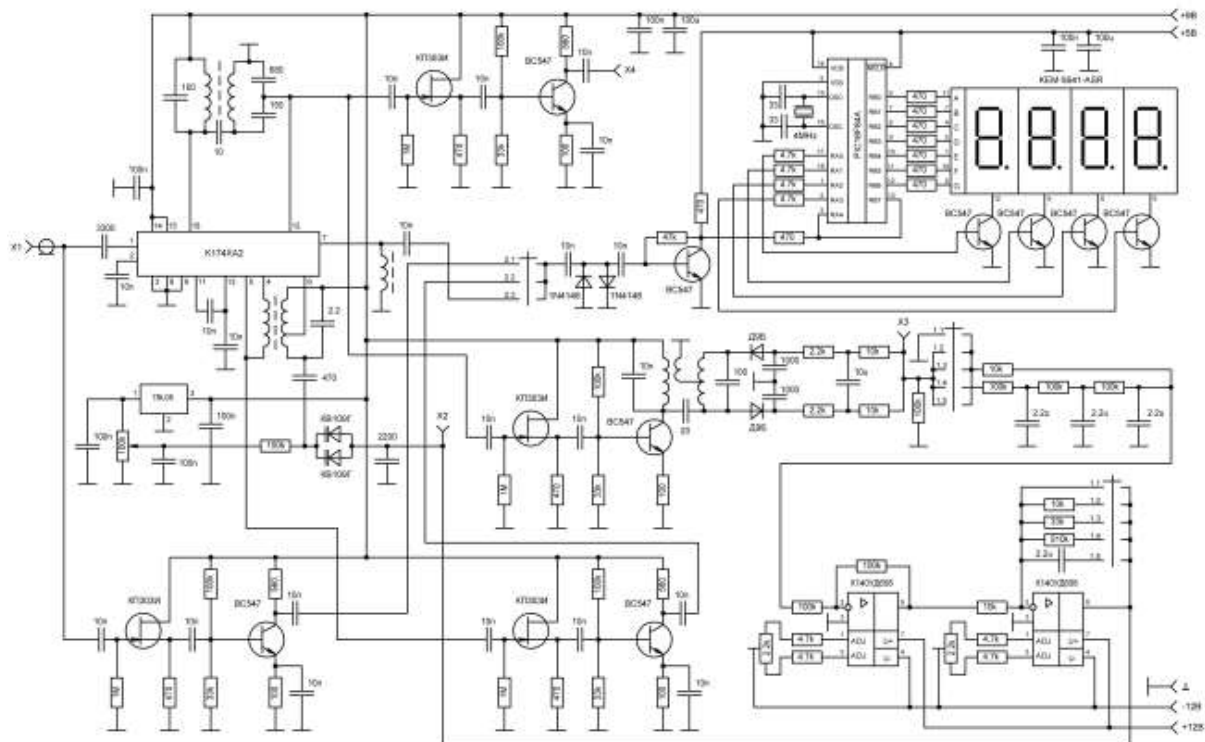


Рисунок 1.9 – Принципова схема лабораторного стану

1.7 Експериментальна частина

1. Ввімкнути стенд. Атенуатор вимірювального генератора встановити у положення 40 дБ, виставити амплітуду сигналу від вимірювального генератора ГЗ-112 у межах 7..10 мВ (повний розмах вхідного сигналу від піку до піку складає 15...20 мВ), частоту сигналу $f \approx 1,5$ МГц.

2. Перемикачі на стенді встановити в такі положення: SA1-1 (система ЧАП розімкнена), SA2-в положення 2 (вихід частотоміра через буферний каскад підключено до вихідного підсилювача тракту проміжної частоти ППЧ2).

3. Провести вимірювання статичної детекторної характеристики частотного дискримінатора.

Спочатку необхідно настроїти вимірювальний генератор на частоту основного каналу прийому. Подати сигнал від вимірювального генератора ГЗ-112 до входу стенда (коаксіальне гніздо X1). Підключити вольтметр постійного струму до виходу частотного дискримінатора (гніздо X2). Осцилограф підключити до коаксіального гнізда X3 (здійснюється контроль сигналу проміжної частоти на виході ППЧ1). За допомогою осцилографа переконатися, що вихідний сигнал тракту ПЧ не має суттєвих спотворень у смузі пропускання.

Змінюючи частоту вхідного сигналу $f_{\text{вх}}$ від ГЗ-112 в діапазоні 1,4...1,6 МГц і контролюючи напругу вольтметром постійного струму на виході ЧД_{пр} фіксують значення частоти ГЗ-112 для якого напруга на виході дискримінатора стане рівною нулю. Одночасно фіксується миттєве значення проміжної частоти, яке, як було визначено у параграфі 2.2, повинно бути рівним 4,5 МГц, а також значення частоти гетеродина f_r (перше положення перемикача SA2). Переконатися, що в схемі дійсно відбувається перетворення частоти за законом $f_{\text{пр}} = f_r - f_c$.

Зафіксовані частоти вимірювального генератора ГЗ-112 і тракту проміжної частоти відповідають номінальній частоті основного каналу прийому f_{c0} і центральній частоті смуги пропускання тракту проміжної частоти $f_{\text{пр}0}$ а, оскільки для значення $f_{\text{пр}0}$ вихідна напруга ЧД_{пр} рівняється нулю, то $f_{\text{пр}0}$ рівняється також перехідній частоті дискримінатора $f_{\text{пер}}$. Відповідно f_{r0} це номінальне значення частоти гетеродина для основного каналу прийому.

Повернути перемикач SA2 у друге положення.

Після цього змінюючи частоту ГЗ-112 як у бік більших значень частоти, так і менших значень порівняно з частотою основного каналу f_{c0} , з кроком 40..60 кГц (два-три ділення за лімбом ГЗ-112) провести вимірювання дискримінаційної характеристики ЧД_{пр} - $U_{\text{вихЧД}}=F(\Delta f)$, де $U_{\text{вихЧД}}$ – це показання вольметра постійного струму, $\Delta f=f_{\text{пр}}-f_{\text{пр0}}$ – відхилення миттєвого значення проміжної частоти $f_{\text{пр}}$ від номінального значення визначеного для основного каналу прийому $f_{\text{пр0}}=4,5$ МГц. Частоту від ГЗ-112 змінювати у межах від 1,2 МГц до 1,7 МГц.

За результатами експерименту визначити коефіцієнт передачі ЧД (крутість детекторної характеристики на ліній ділянці):

$$K_{\text{ЧД}} = \frac{dU_{\text{вихЧД}}}{d(\Delta f)} \big|_{\Delta f=0} \approx \frac{\Delta U_{\text{вихЧД}}}{\delta(\Delta f)}.$$

4. Провести вимірювання наскрізної характеристики тракту ПЧ при розімкненому колі системи ЧАП.

Повторити настроювання ГЗ-112 на частоту основного каналу прийому. Переконалися, що напруга на виході вольметра постійного струму рівняється нулю. Зафіксувати номінальне значення проміжної частоти $f_{\text{пр0}}$ (друге положення перемикача SA2). Також зафіксувати номінальне значення частоти вхідного сигналу (третє положення перемикача SA2).

Після цього повільно змінюючи частоту ГЗ-112 з кроком 40...60 кГц як у бік більших значень частоти (до частоти 1,7 МГц), так і менших значень порівняно з частотою основного каналу (до 1,2 МГц) провести вимірювання наскрізної характеристик $f_{\text{пр}}=F(f_{\text{вх}})$.

Отримані експериментальні результати потім надати у звіті у вигляді звичному для систем регулювання як:

$$\Delta f_{\text{пр}}=F(\Delta f_{\text{поч}}),$$

де $\Delta f_{\text{поч}}=f_{\text{вх}}-f_{c0}$, $\Delta f_{\text{пр}}=f_{\text{пр0}}-f_{\text{пр}}$.

5. Провести вимірювання характеристики регулювання ГКН.

Частоту вхідного сигналу від ГЗ-112 встановити рівній номінальній $f_{c0} \approx 1,5$ МГц. Перевести перемикач SA1 в положення 2

(коло зворотного зв'язку системи ЧАП замикається), а перемикач SA1 в положення 1 (в цьому положенні цифровий частотомір підключається через буферний каскад до гетеродина приймача). Вольтметр постійного струму залишити підключеним до гнізда X2.

Відповідно до функціональної схеми стенда у другому положенні SA1 коло зворотного зв'язку ЧАП замкнено і вихідний сигнал ЧД через ФНЧ і буферний каскад надходить до керуючого елементу. Враховуючи, що коефіцієнт передачі ФНЧ у смузі пропускання можна прийняти рівним 1, а буферні каскади також мають одиничний коефіцієнт підсилення з напруги, то чисельне значення вихідної напруги ЧД в усталеному режимі може розглядатися, як напруга управління для керуючого елемента системи ЧАП.

Повільно змінюючи частоту ГЗ-112 як у бік більших значень так і у бік менших значень частоти з кроком 40...60 кГц для кожного значення частоти гетеродина зафіксувати значення вихідної напруги вольтметра постійного струму, яке можна розглядати як напругу управління $U_{упр}$, і відповідне значення частоти гетеродина f_r . За результатами експерименту побудувати залежність:

$$f_r = F(U_{упр}).$$

За характеристикою регулювання визначити коефіцієнт передачі ГКН, як

$$K_{ГКН} = \left| \frac{d(f_r)}{d(U_{упр})} \right|_{U_{упр}=0} \approx \left| \frac{\delta(f_r)}{\Delta U_{упр}} \right|.$$

6. За результатами експериментів і розрахунків, проведених у пунктах 3,5, обчислити значення коефіцієнта автопідстроювання статичної системи ЧАП:

$$K = 1 + K_{ЧД} \cdot K_{ГКН}.$$

7. Провести вимірювання наскрізної характеристики системи ЧАП при замкненому колі регулювання.

Перемикач SA1 залишити у положенні 2, а осцилограф підключеним до коаксіального гнізда X3.

Провести настроювання на частоту основного каналу прийому – вихідна напруга вольтметра постійного струму рівняється нулю, миттєве значення проміжної частоти рівняється номінальному $f_{пр}=f_{про}=4,5$ МГц (контроль проводиться у другому положенні перемикача SA2.) і миттєве значення частоти вхідного сигналу рівняється номінальному (контроль проводиться у третьому положенні перемикача SA2.).

Повільно змінюючи частоту вхідного сигналу у бік більших значень частоти з кроком приблизно 60 кГц для кожного поточного значення частоти ГЗ-112 зафіксувати миттєві значення проміжної частоти (друге положення перемикача SA2) і частоти вхідного сигналу (третє положення перемикача SA2) . Переконатися, що через дію системи ЧАП відхилення проміжної частоти від номінального стає меншим порівняно з відхиленням частоти вхідного сигналу від номінального. Це означає, що система ЧАП знаходиться в режимі утримання і відбувається зменшення початкового частотного розладу.

Продовжувати збільшення частоти вхідного сигналу з тим же кроком до частоти на якій відбудеться зрив режиму утримання. Цей момент досить легко від слідкувати за допомогою осцилографа в момент зникнення або суттєвого зменшення амплітуди коливання на виході тракту проміжної частоти. Це означає, що система ЧАП вийшла за межі смуги утримання і функціонування ЧАП при таких частотних розладах неможливе. Визначене значення частоти вхідного сигналу відповідає правій межі смуги утримання $f_{утр2}$.

Продовжити збільшення частоти вхідного сигналу ще для двох частотних точок. Переконатися, що відхилення проміжної частоти від номінального значення практично рівняється відхиленню частоти вхідного сигналу від номінального.

Тепер змінити напрям зміни частоти і від останньої частотної точки (за межами смуги утримання) почати зменшення частоти сигналу від ГЗ-112 з відповідною фіксацією частотоміром миттєвих значень проміжної частоти і частоти вхідного сигналу. **Звернути увагу, що під час зменшення частоти в момент проходження значення частоти вхідного сигналу, яке відповідало правій межі смуги утримання $f_{утр2}$ повернення до нормального функціонування системи ЧАП не відбувається.**

Продовжуючи зменшення частоти вхідного сигналу відзначити частоту для якої спостерігається включення системи ЧАП з відповідним зменшенням помилки (відхилення миттєвого значення проміжної частоти відносно номінального). Отримане значення частоти вхідного сигналу відповідає правій межі смуги захоплення $f_{\text{зах}2}$.

Продовжити зменшення частоти і процес вимірювання до частоти вхідного сигналу, яка відповідає номінальному значенню частоти f_{c0} (значення проміжної частоти рівняється номінальному 4,5 МГц). Тепер повторити вимірювання для частот вхідного сигналу менших за f_{c0} , тобто у бік зменшення частоти від ГЗ-112 відносно номінального.

Аналогічно для кожної частотної точки зафіксувати значення миттєвої частоти вхідного сигналу (положення 3 перемикача SA2) і миттєвого значення проміжної частоти (положення 2 перемикача SA2). Вимірювання проводити до моменту, коли відбудеться зрив або суттєве зменшення амплітуди коливань на виході тракту ПЧ (контроль здійснюється за допомогою осцилографа). Отримане значення частоти відповідає лівій межі смуги утримання $f_{\text{утр}1}$. Продовжити зменшення частоти для двох частотних точок. Переконатися, що частотний розлад проміжної частоти практично рівняється частотному розладу вхідного сигналу.

Тепер знову змінити напрям зміни частоти і від останньої частотної точки (за межами смуги утримання) почати збільшення частоти сигналу від ГЗ-112 з відповідною фіксацією частотоміром миттєвих значень проміжної частоти і частоти вхідного сигналу. **Звернути увагу, що під час збільшення частоти в момент проходження значення частоти вхідного сигналу, яке відповідало лівій межі смуги утримання $f_{\text{утр}1}$ повернення до нормального функціонування системи ЧАП не відбувається.**

Продовжуючи збільшення частоти вхідного сигналу відзначити частоту для якої спостерігається включення системи ЧАП з відповідним зменшенням помилки (відхилення миттєвого значення проміжної частоти відносно номінального). Отримане значення частоти вхідного сигналу відповідає лівій межі смуги захоплення $f_{\text{зах}1}$.

Отримані експериментальні результати надати у вигляді звичному для систем регулювання як:

$$\Delta f_{\text{пр}} = F(\Delta f_{\text{поч}}),$$

де $\Delta f_{\text{поч}} = f_{\text{вх}} - f_{\text{с0}}$, $\Delta f_{\text{пр}} = f_{\text{пр0}} - f_{\text{пр}}$.

Якщо вимірювання проведені коректно, то наскрізна характеристика повинна мати вигляд, який зображено на рис. 1.10.

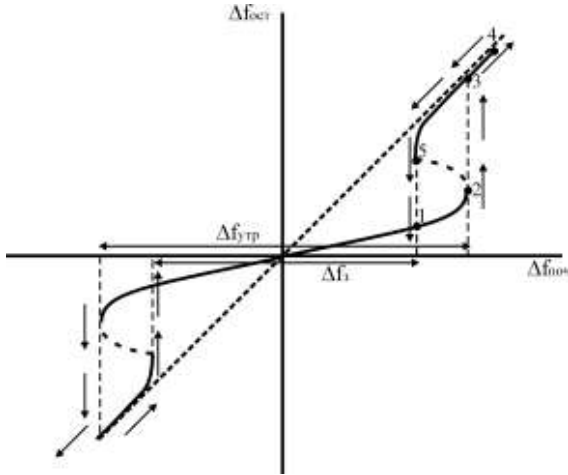


Рисунок 1.10 – Характеристика регулювання ЧАП

Штрих-пунктирна пряма (бисектриса) відповідає розімкненому контуру регулювання (результати експеримента за пунктом 4). Як видно з рис.3.1 характеристика регулювання ЧАП має неоднозначність (гістерезис) для значень $\Delta f_3 < \Delta f_{\text{поч}} < \Delta f_{\text{утр}}$. На цьому інтервалі характеристика регулювання відмічена штриховою лінією, оскільки це область нестійкого стану для якої неможливо реалізувати положення ЧАП, яке фізично реалізується.

За побудованою наскрізною характеристикою регулювання системи ЧАП визначити:

- 1) смугу утримання як $\Delta f_{\text{утр}} = f_{\text{утр2}} - f_{\text{утр1}}$;
- 2) смугу захоплення як $\Delta f_3 = f_{32} - f_{31}$;
- 3) коефіцієнт автопідстроювання як:

$$K_{\text{АПЧ}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{ост}}},$$

де значення $\Delta f_{\text{поч}} = f_{\text{вх}} - f_{c0}$, $\Delta f_{\text{ост}} = \Delta f_{\text{пр}} = f_{\text{пр0}} - f_{\text{пр}}$ взяти для точок, які визначають смугу захоплення в режимі утримання частоти.

Порівняти значення $K_{\text{АПЧ}}$ з результатами теоретичного розрахунку отриманого у пункті 6.

8. Визначення режимів утримання і захоплення частоти.

Виставити частоту вхідного сигналу від ГЗ-112 більшу за значення $f_{\text{утр2}}$, яке було визначене у пункті 8. Відключити напругу живлення від ГЗ-112, а потім через 3...4 с включити генератор. Переконалися за допомогою осцилографа, що система ЧАП не функціонує.

Встановити частоту ГЗ-112 у межах $f_{32} < f_{\text{вх}} < f_{\text{утр2}}$. Повторити експеримент з відключенням ГЗ-112. Переконалися, що і в такому варіанті працездатність ЧАП не поновлюється.

Встановити частоту ГЗ-112 у межах $f_{\text{вх}} \leq f_{32}$. Повторити експеримент з відключенням ГЗ-112. Переконалися за допомогою осцилографа, що система ЧАП поновлює своє нормальне функціонування і остаточна помилка $\Delta f_{\text{ост}} = \Delta f_{\text{пр}} = f_{\text{пр0}} - f_{\text{пр}}$ зменшується в коефіцієнт автопідстроювання разів відносно початкового частотного розладу $\Delta f_{\text{поч}} = f_{\text{вх}} - f_{c0}$.

Тобто, режим захоплення характеризує діапазон початкових частотних розладів у межах якого система ЧАП спроможна компенсувати початкову помилку в момент включення.

9. Провести дослідження впливу значення коефіцієнта передачі по контуру регулювання на характеристики системи ЧАП.

Переключити перемикач SA1 у третє положення. При цьому в контур регулювання включається додатковий підсилювач постійного струму з коефіцієнтом підсилення з напруги $K_U = 3$.

Провести налаштування на частоту основного каналу прийому – вихідна напруга вольтметра постійного струму рівняється нулю, миттєве значення проміжної частоти рівняється номінальному $f_{\text{пр}} = f_{\text{пр0}} = 4,5$ МГц (контроль проводиться у другому положенні перемикача SA2.) і миттєве значення частоти вхідного сигналу рівняється номінальному (контроль проводиться у третьому положенні перемикача SA2.).

Повторити вимірювання наскрізної характеристики для нового значення коефіцієнта підсилення по контуру регулювання (повністю за методикою пункту 7).

За побудованою наскрізною характеристикою регулювання системи ЧАП визначити:

- 1) смугу утримання як $\Delta f_{\text{утр}} = f_{\text{утр}2} - f_{\text{утр}1}$;
- 2) смугу захоплення як $\Delta f_3 = f_{32} - f_{31}$;
- 3) коефіцієнт автопідстроювання як:

$$K_{\text{АПЧ}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{ост}}}.$$

Порівняти значення отриманих параметрів з результатами отриманими у пункті 7. Зробити висновок про вплив коефіцієнта передачі по контуру регулювання на характеристики ЧАП.

10. Дослідити ЧАП в режимі втрати стійкості.

Повернути частоту ГЗ-112 до номінального значення. Перевести перемикач SA1 в четверте положення.

При такому положенні перемикача в контур регулювання замість ФНЧ першого порядку включено ФНЧ третього порядку, який може теоретично привнести фазовий набіг по контуру зворотного зв'язку -270° . Таким чином, якщо для кола зворотного зв'язку фазовий зсув перевищує -180° , то виконується умова балансу фаз (тобто від'ємний зворотний зв'язок перетворюється на додатний зворотний зв'язок). Для виконання умови балансу амплітуд у цьому положенні перемикача також збільшено коефіцієнт передачі по контуру регулювання за допомогою додаткового підсилювача постійного струму ППС2 з наскрізним коефіцієнтом підсилення $K_{\text{У}} \approx 23$.

Таким чином, включення до контуру регулювання багатоланкового RC-фільтра і ППС2 дозволяє дослідити ЧАП в режимі самозбудження. Під час самозбудження системи ЧАП виникає частотна модуляція напруги проміжної частоти. На виході ППЧ коливання з частотною модуляцією через наявність резонансних контурів перетворюються в коливання з амплітудно-частотною модуляцією. Амплітудна модуляція дозволяє за допомогою осцилографа, підключеного до виходу ППЧ проконтролювати режим системи ЧАП.

Проконтролювати епюри коливань на виході тракту проміжної частоти для декількох значень частоти вхідного сигналу.

11. Повернути частоту вхідного сигналу від ГЗ-112 до номінальної частоти основного каналу прийому $f=f_{co}$. Перемикач SA1 перевести у п'яте положення. При цьому в контур регулювання замість підсилювача постійного струму вмикається інтегратор на операційному підсилювачі. Оскільки інтегратор реалізовано в інвертуючому включенні, то для того щоб фаза сигналу помилки не інвертувалася, перед інтегратором включено інвертуючий повторювач напруги з коефіцієнтом передачі -1.

Повторити вимірювання наскрізної характеристики системи ЧАП аналогічно пунктам 7,8. Переконатися, що у такому варіанті система ЧАП у межах смуги утримання має нульове значення помилки. Оскільки в контурі регулювання присутній один інтегратор, то запропонована система репрезентує систему з управлінням за помилкою з астатизмом першого порядку.

За побудованою наскрізною характеристикою регулювання системи ЧАП визначити:

- 1) смугу утримання як $\Delta f_{\text{утр}} = f_{\text{утр}2} - f_{\text{утр}1}$;
- 2) смугу захоплення як $\Delta f_3 = f_{32} - f_{31}$.

1.8 Контрольні запитання

1. Принцип дії системи частотного автопідстроювання.
2. Характеристики системи ЧАП. Смуга утримання і смуга захоплення.
3. Функціональна схема системи ЧАП для стабілізації проміжної частоти супергетеродинного приймача.
4. Структурна схема статичної системи ЧАП лабораторного стенду.
5. Визначення передавальної функції помилки контуру ЧАП у варіанті статичної системи.
6. Функції ФНЧ в системі ЧАП.
7. Функціональна схема ЧАП з астатизмом першого порядку.
8. Структурна схема ЧАП з астатизмом першого порядку.
9. Визначення передавальної функції помилки контуру ЧАП у варіанті астатичної системи. першого порядку.
10. Використання системи ЧАП в якості слідкуючого фільтра, якщо інформація закладена в амплітуді вхідного сигналу.

11. Використання системи ЧАП в якості слідкуючого фільтра , якщо інформація закладена в частоті вхідного сигналу.
12. Алгоритм роботи ГКН системи ЧАП.
13. Частотні дискримінатори системи ЧАП. Типова статична детекторна характеристика.
14. Перехідні процеси в системі ЧАП.
15. Нелінійний режим роботи системи ЧАП.
16. Як оцінити стійкість системи ЧАП?

1.9 Література

1. Первачев О.В. Радиоавтоматика. – М.: "Радио и связь", 1982. – 294 с.
2. Радиоавтоматика. Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: "Высшая школа", 1985. – 270 с.
3. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств / Белкин М.К., Белинский Б.Т., Мазор Ю.Л., Терещук Р.М. – Киев: "Вища школа", 1982. – 477 с.
4. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. – М: "Высшая школа", 1990. – 135 с.
5. Буга Н.Н., Фалько А.Н., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. – М.: "Радио и связь", 1986, – 320 с.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ АВТОПІДСТРОЙКИ

2.1 Мета роботи

Закріпити знання з розділу курсу "Системи фазового автопідстроювання частоти", експериментальне дослідити режими синхронізації і захоплення ФАПЧ, різні варіанти застосування систем фазового автопідстроювання.

2.2 Прилади, що використовуються в роботі

1. Осцилограф СІ-74 для візуального контролю форми вхідного і вихідного сигналів системи ФАП.
2. Генератор ГЗ-112 – джерело напруги прямокутної форми ("меандр").
3. Вольтметр ВУ-15 – для вимірювання напруги постійного і змінного струму.

2.3 Підготовка до роботи

1. Вивчити розділ курсу "Системи фазової автопідстройки".
2. Ознайомитись з схемою і конструкцією стенда для даної роботи.
3. Зобразити якісно передаточні характеристики системи ФАП.

2.4 Загальні відомості

Системи фазового автопідстроювання, у яких в процесі стеження за фазою сигналу змінюється частота генератора, що керується, отримали широке застосування на практиці. Інколи їх називають системами фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Системи ФАПЧ забезпечують стабілізацію частоти генератора, що керується по опорному сигналу або її стеження за змінною частотою вхідної напруги. Особливістю систем ФАПЧ є той факт, що

стабілізація частоти генератора що керується або її стеження за частотою опорної напруги досягається через підтримання з визначеною точністю рівності або зсуву фаз на 90 опорного сигналу і сигналу, який підлягає регулюванню.

Система ФАПЧ (рис. 2.1) містить фазовий дискримінатор (вимірювач фазового розузгодження) ФД, фільтр нижніх частот ФНЧ, підсилювач-перетворювач ПП, генератор, що керується напругою (підстроюється) ПГ.

Система ФАПЧ

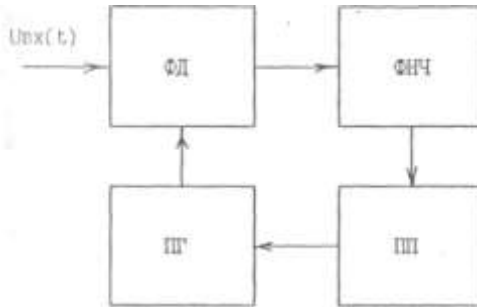


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи ФАПЧ

На ФД поступають опорна напруга $U_{вх}(t) = U_m \sin(\omega_1(t) \cdot t)$, фаза якого $\alpha(t) = \int \omega_1(t) dt$ є збуджуючою дією системи, і через зворотній зв'язок напруга – ПП $U_{вих}(t) = U_m \sin(\omega_2(t) \cdot t)$, фаза якого $\beta(t) = \int \omega_2(t) dt$ є величиною, яка підлягає управлінню системою автопідстроювання, що керується в системі.

Якщо $\omega_1(t) = \omega = const$, отже якщо кутова частота опорної напруги $U_{вих}(t)$ постійна, то його фаза, змінюється за лінійним законом $\alpha(t) = \omega_1(t) \cdot t$.

Фазовий дискримінатор перетворює відхилення $\varphi(t)$ фази $\beta(t)$ напруги генератора, що керується від фази (t) опорної напруги в напругу постійного струму $U_{fd}(t)$ величина якого при малих відхиленнях пропорційна $\varphi(t)$, а полярність визначається знаком цього відхилення. Напруга U_{fd} згладжується фільтром і через підсилювач-перетворювач надається на керуючий елемент ПГ. При зміні керуючої напруги на вході ПГ змінюється його частота. Якщо частоти опорної і керуючої напруги не рівні $\omega_1(t) \neq \omega_2(t)$, то змінюється різниця фаз $\varphi(t)$, і таким чином, напруга $U_{fd}(t)$.

Припустимо, наприклад, $\varphi(t)$ збільшується, починаючи з нуля, при цьому зростає $U_{fd}(t)$ і напруга на вході управління генератору, що керується (ГКН), що призводить до зміни частоти $\omega_2(t)$. Зростання $\varphi(t)$ і $\omega_2(t)$ відбувається до тих пір, поки частота $\omega_2(t)$ не стане рівною $\omega_1(t)$. До "захоплення" та при зриві роботи, який можливий внаслідок впливу обурюючих подій або різких змінах частоти $\omega_1(t)$, різниця фаз $\varphi(t)$ і $U_{fd}(t)$ змінюється у часі з частотою $\omega(t) = \omega_1(t) - \omega_2(t)$.

Таким чином, якщо частота вхідного сигналу достатньо близька до частоти ПГ, то дія зворотного зв'язку в схемі ФАПЧ приведе до того, що генератор, що керується стає синхронізованим частотою вхідного сигналом (використовується термін "захоплення" частоти). Після того, як захоплення відбулося, частота генератора стає рівною частоті вхідного сигналу, а зсув фаз між ними має кінцеву величину. Ця різниця фаз необхідна для отримання напруги розузгодження U_{fd} для перестроювання генератора від частоти вільних коливань на частоту вхідного сигналу і підтримки контура ФАПЧ в режимі синхронізації. Ця здатність системи ФАПЧ дозволяє відстежувати зміну частоти вхідного сигналу після синхронізації генератора.

Діапазон частот, в якому система ФАП може підтримувати синхронізацію з вхідним сигналом, визначається як діапазон або смуга утримання. Діапазон синхронізації завжди більше діапазону частот у якому система ФАП може входити у режим синхронізації. Останній діапазон частот відомий як діапазон або смуга захоплення.

Покладаючи коефіцієнт передачі ФНЧ з постійного струму рівним одиниці, є можливим показати, що:

$$\Delta\omega_c = K_{гн} \cdot K_{фд} \cdot K_n,$$

де $K_{гн}$ – коефіцієнт перетворення напруги в частоту генератора, що керується у радіанах на вольт у секунду;

$K_{фд}$ – коефіцієнт фазозрівнюючого пристрою у вольтах на радіан;

K_n – коефіцієнт підсилення підсилювача-перетворювача.

Таким чином, смуга синхронізації чисельно дорівнює повному коефіцієнту передачі в контурі системи. Переходячи до лінійної частоти, отримаємо:

$$\Delta f_c = S_{ng} \cdot K_d \cdot K_n.$$

де S_{ng} – крутизна регулювочної характеристики ПГ, (Гц/в);

K_d – коефіцієнт, який чисельно дорівнює максимально можливій напрузі на виході ФД у вольтах.

Наближений параметричний вираз для смуги захоплення можливо записати у такому вигляді:

$$\Delta\omega_3 = K_{ng} \cdot K_{фд} \cdot K_n |F(j\omega_3)|,$$

де $|F(j\omega_3)|$ – амплітудна характеристика фільтра низьких частот при $\omega = \omega_3$.

Так як в будь-який момент часу $|F(j\omega_3)| < 1$, смуга захоплювання завжди менше смуги синхронізації (утримання). Якщо в якості ФНЧ використовується проста інерційна ланка, то в цьому випадку керування для смуги затримки можна записати в наступному випадку:

$$\Delta\omega_3 = \sqrt{\frac{\Delta\omega_c}{\tau}},$$

де τ – постійна часу фільтра нижніх частот.

2.5 Опис стенду

Схему ФАПЧ, яка пропонується для дослідження, зображено на рис. 2.2.

Елементи DD1.1, DD1.2, C1, R4, DD1.3, DD1.4, C2, R3 виступають як формувачі гострокінцевих імпульсів вхідного сигналу і сигналу з генератора, що керується DD5.1 відповідно.

На мікросхемі DD4 реалізований імпульсно-фазовий детектор на основі асинхронного тригера. Фільтр нижніх частот R10, C3, (C4, C5) являє собою простий інерційний ланцюг, постійну часу якого можливо змінювати за допомогою перемикача S1. Власне генератор, що керується реалізований на мікросхемі DD5.1 531 ГГ1. Перемикачем S2 в невеликих межах змінюється частота мультивібратора на 531 ГИ. Друга половина ІС 531ГГ1 може використовуватись як частотно-модульований генератор при подачі на вхід LSB низькочастотної напруги. Власна частота ЧМГ вибрана набагато більшою частоти основного ПГ в контурі ФАП. Це зроблено з метою отримання максимально можливого, значення девіації частоти від ЧМГ. На мікросхемах DD2, DD3 реалізований дільник частоти на 100 (10).

Перемикач S3 в першому стані замикає зворотній зв'язок в контурі ФАП. В 2-му і 3-му стані контур регулювання розмикається.

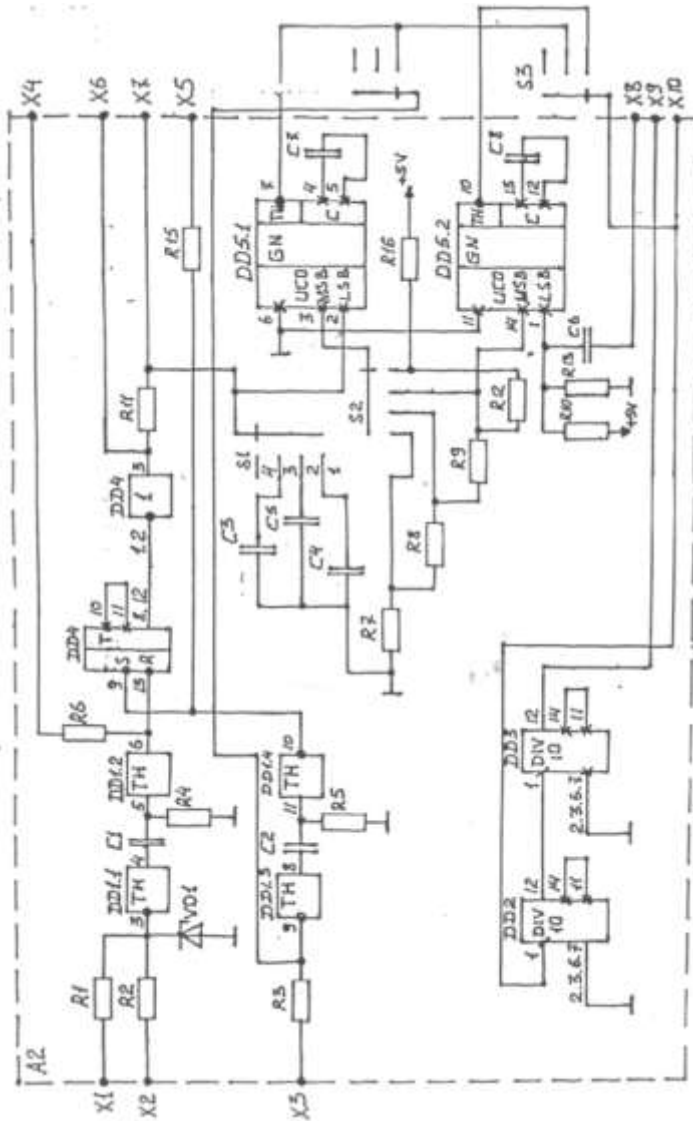


Рисунок 2.2 – Схема ФАПЧ

2.6 Експериментальна частина

1. Ввімкнути стенд. Встановити амплітуду вимірювального генератора 4В, частоту сигналу $f=70$ кГц.

2. Перемикачі на стенді встановити в такі положення: S1-2, S2-3, S3-1. При цьому досліджується основна схема ФАП яка приведена на рис. 6.1.

3. Подати сигнал з виходу вимірювального генератора в коаксіальне гніздо "Вхід" стенда. Контроль вхідного сигналу здійснюється за допомогою гнізда XI. Осцилограф перевести в режим зовнішньої синхронізації, а синхронізуючий сигнал знімати з гнізда X2 (запаралеленого з XI).

4. Подати на другий канал осцилографу вихідний сигнал системи ФАП з гнізда X3. При встановленому значенні частоти вихідний сигнал системи ФАП знаходиться в режимі синхронізації з вхідним. Порівняти частоту вхідного сигналу (XI і сигналу ПГ (X3). Виміряти значення фазового зсуву між двома імпульсними послідовностями.

5. Повільно зменшуючи частоту вимірювального генератору переконатися, що частота ПГ синхронно змінюється з частотою вимірювального генератору.

По мірі зменшення частоти зафіксувати значення частоти при якому відбудеться зрив синхронізації вихідного сигналу. Відмічене значення частоти відповідає лівій (нижній) межі смуги утримання $f_c^{\text{`}}$. Зменшити частоту вхідного сигналу на 20-25 кГц, в порівнянні з відміченою. Потім повільно підвищуючи частоту знову отримати синхронізацію вихідного сигналу на екрані осцилографу. При цьому треба переконатися, що частоти вхідного сигналу і ПГ однакові та синхронно змінюються з підвищенням частоти вимірювального генератору. Відмічене значення частоти відповідає нижній границі смуги захоплення $f_z^{\text{`}}$.

Підвищуючи частоту вимірювального генератору знову зафіксувати момент, при якому відбудеться зрив синхронізації вихідних коливань. (При цьому необхідно звертати увагу на частоту коливань ПГ, оскільки можливий практично миттєвий перехід в режимі синхронізації на 2-й гармоніці. Це явище також розглядається

як зрив синхронізації.). Відмічене значення частоти відповідає правій границі смуги утримання $f_c^{\prime\prime}$. Потім, повільно зменшуючи частоту вхідного сигналу, знову – добитися режиму синхронізації і відмітити значення частоти, відповідаюче верхній (правій) границі смуги захоплення $f_3^{\prime\prime}$.

Визначити значення діапазонів утримання Δf_c і захвату Δf_3 ,:

$$\Delta f_c = f_c^{\prime\prime} - f_c^{\prime},$$

$$\Delta f_3 = f_3^{\prime\prime} - f_3^{\prime}.$$

6. Перемикач S1 перевести в положення 3. При цьому постійна часу фільтра підвищиться. Повторити вимірювання по п. 5 при новому значенні постійної часу. Порівняти значення полос захоплення і утримання.

7. Перемикач SI перевести в стан 4 (максимальне значення постійної часу фільтра). Проконтролювати форму вихідного сигналу (гніздо X3). Впевнитись, що при зміні частоти сигналу в діапазоні 10-100 кГц система ФАП не реагує на вхідний сигнал.

8. Перемикач S1 повернути в стан 2. Замалювати осцилограми на обох входах ІФД (гнізда X4, X5), а також на виході ІФД до фільтра (гніздо X6) і після фільтра (гніздо X7). Для двох значень частоти в діапазоні синхронізації виміряти значення фазового зсуву між послідовностями φ_1 і φ_2 . Одночасно заміряти значення постійного струму на виході фільтра U1 і U2.

По результатам досліду визначити крутизну дискримінаційної характеристики:

$$S = \left| \frac{U_1 - U_2}{\varphi_1 - \varphi_2} \right|, [B / p\varnothing]$$

9. Встановивши режим синхронізації в початковому положенні перемикачів (см. п. 2) зняти регулювальну характеристику ПГ. Характеристика знімається у вигляді залежності частоти ПГ, в режимі

синхронізації (контролюється по шкалі вимірювального генератора) від керуючої напруги на виході ФНЧ (гніздо Х7, контролюється вольтметром постійного струму ВУ-15).

За результатами експерименту знайти $S_{\text{еун}}, \Delta f_c, \Delta f_3$, коефіцієнт передачі петлі $K = K_{\text{пг}} K_{\text{фд}}$, а також обчислити $\Delta f_c, \Delta f_3$ за допомогою наданих вище розрахункових формул 6.1; 6.2.

10. Не змінюючи положення перемикачів на стенді встановити значення частоти вимірювального генератору в межах 33-36кГц. Добитися синхронізації частоти ПГ на 2-й гармоніці вхідного сигналу. Замалювати осцилограми сигналів вимірювального генератору і ПГ.

Встановити частоту вхідного сигналу в межах 158-160кГц. Добитися синхронізації частоти ПГ на 2-й субгармоніці вхідного сигналу. Замалювати осцилограми сигналів Вимірювального генератора і ПГ.

11. Розімкнути контур ФАП Для цього перемикач S3 перевести в стан 3. Виміряти АЧХ фільтра нижніх частот. Вхідний сигнал с амплітудою U-1 В надати до гнізда Х6, вихідний контролювати вольтметром змінного струму у гнізді Х7. Частоту змінювати від 25 Гц до 10 кГц.

12. Дослідити ФАП у режимі демодуляції частотно-модульованих коливань.

З цією метою відімкнути сигнал вимірювального генератору від коаксіального гнізда "Вхід". Осцилограф перевести в режим внутрішньої синхронізації. Від'єднати кабелі від гнізд Х1, Х2, Х3.

12.1. Встановити частоту сигналу вимірювального генератора 100 Гц, амплітуду 0,25 В. Подати сигнал генератора в гніздо Х8. В цьому випадку другий мультівібратор ІС 531ГГ1 виступає як ЧМГ.

12.2. Перемикач S3 перевести в третій стан. За допомогою перемикачки закортити гнізда Х10 і Х1. В цьому випадку на вхід системи ФАП надається частотно-модульована напруга з частотою модуляції $f_{\text{мод}} = 100\text{Гц}$.

12.3. Вихідний сигнал ЧМ-демодулятору контролювати з гнізда Х7 – вихід ФНЧ системи ФАП. Замалювати форму вихідного сигналу. Підвищуючи частоту модулюючого сигналу і контролюючи форму сигналу з гнізда Х7 підмітити значення частоти при якому виникнуть значні спотворення продемодульованого сигналу.

2.7 Контрольні запитання

1. Принцип дії фазової автопідстройки.
2. Характеристики системи ФАП.
3. Функції ФНЧ в системі ФАП,
4. Розрахувати передатну функцію контуру ФАП для схеми
стенду.
5. Використання системи ФАП для демодуляції ЧМ сигналу.
6. Використання системи ФАП для демодуляції АМ сигналу.
7. Синхронізація частоти з живленням ФАП
8. Використання ФАП в якості стежачих фільтрів.
9. Використання ФАП для добутку та розподілення частоти.
10. Записати диференціальне рівняння, що описує роботу ФАП.
11. Вимоги до ПГ в системі ФАП.
12. Як оцінити стійкість системи ФАП?
13. Поясніть можливість синхронізації на гармоніках.
14. Що називають коефіцієнтом передачі по петлі?
15. Привести структурну схему ФАП, що досліджується у
лабораторній роботі

2.8 Література

1. Первачев О.В. Радиоавтоматика. – М.: "Радио и связь", 1982. – 294 с.
2. Радиоавтоматика. Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: "Высшая школа", 1985. – 270 с.
3. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств / Белкин М.К., Белинский Б.Т., Мазор Ю.Л., Терещук Р.М. – Киев: "Вища школа", 1982. – 477 с.
4. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. – М.: "Высшая школа", 1990. – 135 с.
5. Буга Н.Н., Фалько А.Н., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. – М.: "Радио и связь", 1986, – 320 с.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АРП

3.1 Мета роботи

Закріпити знання по темі "Системи автоматичного регулювання підсилення", експериментально дослідити регулювальну і статичну характеристику АРП з затримкою.

3.2 Прилади, що використовуються в роботі

1. Генератор ГЗ-112 – використовується як джерело гармонічного збудження.
2. Осцилограф СІ-74 – призначений для спостережень форми вихідних та вхідних напруг.
3. Вольтметр ВЗ-38 (ВЗ-56) – для вимірювання вхідного сигналу.
4. Вольтметр ВУ-15 – використовується для вимірювання вихідної напруги у контрольному гнізді Х5.

3.3 Підготовка до роботи

1. Вивчити матеріал по темі "Системи автоматичного регулювання підсилення".
2. Ознайомитись з схемою і конструкцією стенда згідно поданому опису.
3. Ознайомитись з завданням дослідницької частини роботи і продумати послідовність виконання роботи в лабораторії.
4. Зобразити графіки регулювальної та статичної характеристик АРП.

3.4 Загальні відомості

Системи АРП використовують в радіоприймальних пристроях різного призначення (радіолокаційних, зв'язних, навігаційних і ін.) для того, щоб при значних змінах амплітуди вхідного сигналу підтримувати постійними амплітуди на вході детектора та підсилювача низької частоти. Це необхідно для підтримки гучності радіоприймача, запобігання перевантаження та появи нелінійних спотворень у його вихідних каскадах при великих амплітудах вхідного сигналу.

У радіоавтоматиці системи АРП застосовують для стабілізації коефіцієнту передачі вимірювальних пристроїв. При цьому велике значення мають динамічні характеристики системи АРП так як перехідні процеси впливають на роботу інших систем.

В залежності від способу функціонального взаємозв'язку каскадів, що регулюються та джерела керуючої напруги розрізняють три головні системи АРП: системи з зворотнім (рис. 3.1а), прямим (рис. 3.1б) та сумішним регулюванням. У системі з зворотним регулюванням керуюча напруга визначається рівнем напруги сигналу на виході. Така система АРП є найбільш простою і дозволяє отримати амплітудну характеристику приймача, близьку до ідеальної. При зміні амплітуди напруги на виході змінюється керуюча напруга і відповідно коефіцієнт підсилення таким чином, що динамічний діапазон вихідних сигналів робиться значно менше динамічного діапазону вхідних сигналів. Всі зміни коефіцієнту передачі автоматично враховуються системою, оскільки діє зворотний зв'язок з виходу на вхід.

Дія системи АРП основана не на порівнянні вихідного сигналу з вхідним, а на зміні параметру (коефіцієнту передачі) в залежності від сигналу зворотного зв'язку, звідси система АРП є параметричною. Така система АРП відрізняється від відомих систем радіоавтоматики, в яких коефіцієнт передачі є постійна величина.

В системі АРП з прямим регулюванням керуюча напруга визначається напругою сигналу на вході. Недостаті цієї системи АРП, як і інших систем без зворотного зв'язку, такі: спосіб дії не залежить від рівня вихідного сигналу. При зміні коефіцієнту підсилення вихідних каскадів регулююча напруга не змінюється, а рівень стабілізації вихідної напруги змінюється. Крім того, система АРП "вперед" не дозволяє підтримувати нормальний режим роботи підсилювача в дуже широкому діапазоні зміни амплітуди вхідних сигналів і, отже, не витримує однієї з головних функцій, покладених на неї. Тому вона використовується як допоміжна у системі з сумішним регулюванням, де головна роль покладається на зворотне регулювання.

3.5 Опис стенду

На рис. 5.2 зображена схема на ОП, головне призначення якої згоджувати рівні звукових сигналів з студійною апаратурою. При зміні вхідного сигналу в великих межах (від 0,02 до 1,5 В) вихідна напруга схеми залишається практично незмінною, причому нелінійні спотворення сигналу на виході схеми мінімальні. Для керування коефіцієнтом підсилення використовується атенуатор на польовому транзисторі. При відсутності вхідного сигналу транзистор VT1 знаходиться у режимі відсікання, визначене постійною напругою 12 В, прикладеною до затвору. Автоматична регуліровка коефіцієнту підсилення схеми відсутня до тих пір, поки амплітуда напруги на виході ОП не досягне 2 В. При досягненні цієї напруги відчиняються переходи база-емітер біполярних транзисторів VT2, VT3, ввімкнених по схемі Дарлінгтона, що призведе до зменшення зворотньої напруги на затворі VT1. При цьому зменшується динамічний опір каналу ПТ, що еквівалентно послабленню амплітуди вхідного сигналу. Великі значення коефіцієнтів підсилення струму транзисторів, об'єднаних по схемі Дарлінгтона, дозволяють отримати динамічний діапазон послаблення вихідного сигналу на рівні 50 дБ.

3.6 Дослідницька частина

1. Ввімкнути стенд. При виконанні цієї лабораторної роботи використовується той же самий набір функціональних вузлів на ОП, який використовувався у 1-й та 2-й лабораторних роботах. Перемикачі S1, S2, S3 встановити у стан S1.7, S2.1, S3.1 відповідно, а S4 - в S4.1. В цьому стані досліджується схема підсилювача, зображена на рис. 5.2 без АРП (зворотній зв'язок розімкнутий за допомогою перемикача S3).

2. Встановити частоту генератору ГЗ-112 рівною 1000 Гц, при мінімальному рівні вихідного сигналу.

3. Надати вхідний сигнал у гніздо X1 стенду. Вихідну напругу контролювати у гнізді X5 вольтметром ВУ-38 (ВУ-56).

Змінюючи рівень сигналу вимірювального генератору від 5 мВ до 150 мВ зняти амплітудну характеристику підсилювача без АРП $U_{\text{вих}} - f(U_{\text{вх}})$. У двох-трьох точках проконтролювати сигнал осцилографом.

4. Перемикач S3 перевести в стан S3.7. При цьому замикається ланцюг зворотного зв'язку та підсилювач охоплюється системою АРП з затримкою. Змінюючи рівень сигналу вимірювального генератору від 5 мВ до 1,5 В, зняти статичну характеристику системи АРП: $U_{\text{вих}} - f(U_{\text{вх}})$.

На початковому зростаючому відрізку статичної характеристики крок зміни вхідної напруги брати рівним 2,5 мВ.

5. Вихідний сигнал вимірювального генератору встановити на мінімум. Повільно змінюючи рівень сигналу вимірити залежність керуючої напруги (гніздо X6, контролювати вольтметром постійного струму ВУ-15) від амплітуди вхідного сигналу: $U_y - f(U_{\text{вх}})$.

6. За результатами експерименту побудувати регулювальну характеристику: $K_u - f(U_y)$.

Записати аналітичний вираз для апроксимації характеристики і також побудувати її.

7. Визначити ефективність системи АРП шляхом розрахунку коефіцієнту $\epsilon = U_{\text{вих max}} / U_{\text{вих min}}$, де $U_{\text{вих max}}$ і $U_{\text{вих min}}$ відповідно-максимальна та мінімальна вихідна напруга у зоні регулювання.

3.7 Контрольні запитання

1. Приведіть можливі функціональні схеми АРП.
2. Яке основне достоїнство системи АРП з зворотнім регулюванням?
3. Яким чином можливо класифікувати систему АРП по таким критеріям:
 - лінійна, нелінійна;
 - стаціонарна, нестаціонарна; неперервна, дискретна.
4. Які способи регулювання коефіцієнта підсилення застосовуються?
5. Приведіть схеми атенуаторів, що керуються на польових і біполярних транзисторах.
6. Як залежать динамічні характеристики системи АРП від рівня вхідного сигналу?
7. Привести статичні (амплітудні) характеристики підсилювача без АРП, АРП без затримання і АРП з затриманням.
8. Привести структурну схему системи АРП, що досліджується.
9. Яким чином повинна вибиратись постійна часу фільтра АРП при підсиленні модульованих коливань?
10. Поясніть присутність перегинів на статичній характеристиці системи АРП з затриманням.
11. Привести типову регуліровочну характеристику та її аналітичний опис.
12. Яким чином оцінюється ефективність АРП?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ

4.1 Мета роботи

Закріпити знання з розділу курсу "Системи частотного автопідстроювання", експериментально дослідити вплив параметрів функціонально необхідних вузлів ЧАП на помилку роботи, дослідити роботу ЧАП в режимах утримання і захоплення системи, різні варіанти реалізації астатичних систем ЧАП систем фазової автопідстройки.

4.2 Прилади, що використовуються в роботі

1. Осцилограф CI-74 для візуального контролю форми вихідного сигналу тракту проміжної частоти.
2. Генератор ГЗ-112 – джерело вхідного сигналу гармонічної форми
3. Вольтметр ВУ-15 – служить для вимірювання напруги постійного і змінного струму.

4.3 Підготовка до роботи

1. Вивчити розділ курсу "Системи частотного автопідстроювання".
2. Ознайомитись зі схемою й конструкцією стенда для даної роботи.
3. Зобразити якісно основні характеристики системи ЧАП.

4.4 Загальні відомості

У самому загальному випадку принцип дії існуючих систем автопідстроювання частоти (АПЧ) заснований на автоматичному

вимірюванні відхилення частоти генератора, що керується (ГКН) від деякого номінального (або еталонного) значення і підстроюванні цього генератора таким чином, щоб таке відхилення не перевищувало заданої величини.

Будь-яка система АПЧ окрім ГКН повинна до свого складу включати вимірювальний елемент (вимірювач розузгодження), який визначає відхилення частоти генератора від еталонного значення і керуючий елемент, що забезпечує необхідну зміну частоти ГКН.

В системах частотного ЧАП вимірювачем розузгодження виступає частотний дискримінатор, напруга на виході якого $U_{\text{вихд}}$ залежить від відхилення частоти входних сигналів від деякої частоти, що отримала назву перехідної частоти дискримінатора.

Системи АПЧ є нелінійними системами, оскільки в них один або декілька динамічних ланок є нелінійними. Під час аналізу систем АПЧ, як правило, проводиться лінеаризація нелінійних ланок, що дозволяє отримати лінійну модель і на її підставі отримати важливі результати.

Якість системи ЧАП як системи регулювання характеризують декількома показниками. Серед основних характеристик ЧАП необхідно розглянути точність роботи, стійкість, динамічні показники якості, а також параметри що характеризують режими утримання частоти і захоплення частоти.

Точність системи ЧАП визначається відхиленням частоти коливання автогенератора від номінального значення в усталеному режимі. Під час дії на пристар ій окрім корисного сигналу і завади точність визначається середньою і середньо-квадратичною помилкою.

Ефективність роботи системи ЧАП звичайно оцінюється відношенням величини початкового розладу (помилки) автогенератора в момент його включення відносно еталонного значення частоти $\Delta f_{\text{поч.}}$ до остаточної помилки в усталеному режимі роботи $\Delta f_{\text{ост.}}$. Це відношення прийнято називати коефіцієнтом авторегулювання або автопідстроювання [1,2]:

$$K_{\text{АПЧ}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{ост}}} \quad (4.1)$$

Значення коефіцієнта автопідстроювання в статичних системах ЧАП звичайно коливається у межах 30...50. Для деяких спеціальних пристроїв високої точності шляхом ускладнення схеми вдається досягнути значення цієї величини до декілька сотень.

Смуга захоплення визначає діапазон припустимих початкових розладів частоти сигналу, в межах якого пристрій нормально функціонує після його включення.

Смуга утримання визначається як максимально припустима величина власної помилки автогенератора за частотою в усталеному режимі. Смуга утримання характеризує діапазон розстроїв частоти сигналу в межах якого під час повільної зміни частоти вхідного сигналу режим стеження зберігається, якщо система вже була введена у цей режим до цього [1,2,3]. Іншими словами, смуга утримання трактується, як максимальна величина частотного розладу, яка може бути скомпенсована системою ЧАПЧ. Як правило смуга утримання більша за смугу захоплення.

За показниками якості перехідного процесу аналізується процес установлення частоти автогенератора, що стабілізується після включення системи ЧАП або зміни частоти коливань еталонного генератора. Звичайно цей процес має аперіодичний або затухаючий характер.

За видом перехідного процесу визначаються такі параметри як час установлення частоти – тобто час за який частота коливань за перехідним процесом входить до встановленої зони, перегулювання, період власних коливань.

Стійкість роботи системи ЧАП визначається декількома параметрами. Оскільки система ЧАП з управлінням за помилкою представляє систему із замкненим контуром регулювання, тобто з від'ємним зворотним зв'язком, то в ній подібно до автогенератора можуть виникнути власні автоколивання, якщо будуть виконані умови балансу фаз і амплітуд. Такий режим роботи є неприпустимим в системі ЧАП, яка повинна відслідковувати зміни частоти вхідного сигналу, а не утворювати власні коливання.

4.5 Застосування ЧАП для стабілізації проміжної частоти

Функціональна схема супергетеродинного приймача з використанням ЧАП для стабілізації проміжної частоти наведена на рис. 4.1.

На один з входів змішувача (ЗМ) надходить вхідний сигнал – напруга $u_c(t)$ з частотою ω_c . На другий вхід ЗМ подається напруга u_r генератора, що керується напругою (ГКН) з частотою ω_r . На виході ЗМ утворюється напруга проміжної частоти $\omega_{пр} = \omega_c - \omega_r$, яка через підсилювач проміжної частоти (ППЧ) подається до входу частотного дискримінатора (ЧД). На виході ЧД формується напруга $U_{чд}$, пропорційна відхиленню $\Delta\omega_{пр}$ від її номінального значення $\omega_{пр0}$ як за величиною, так і за знаком: $u_{чд}(t) = K_{чд} \Delta\omega_{пр}(t)$, де $\Delta\omega_{пр}(t) = \omega_{пр}(t) - \omega_{пр0}(t)$, $K_{чд}$ – коефіцієнт передачі (перетворення) ЧД. Знак напруги $u_{чд}(t)$ відповідає знаку відхилення $\Delta\omega_{пр}(t)$.

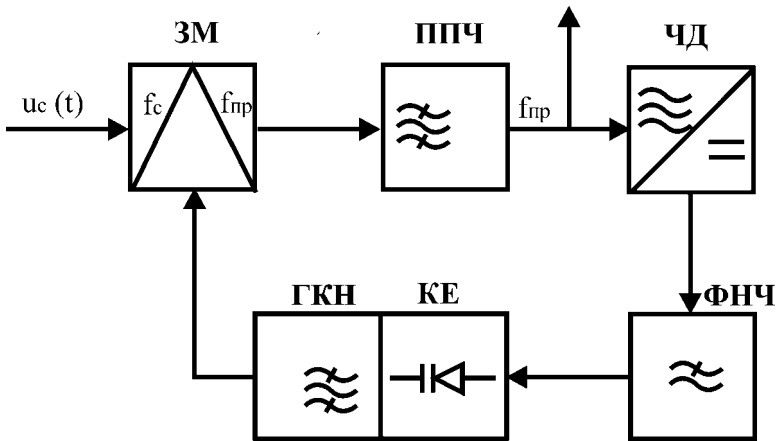


Рисунок 4.1 – Функціональна схема ЧАП для стабілізації проміжної частоти супергетеродинного приймача

Напруга $u_{чд}(t)$ проходить через фільтр нижніх частот (ФНЧ) і подається до керуючого елементу (КЕ) генератора, що керується (ПГ). В результаті змінюється частота ω_r ПГ таким чином, що $\Delta\omega_{пр}$ зменшується.

Таку систему ЧАП можна розглядати як слідкуючу систему, яка забезпечує зміну частоти ω_r генератора, що керується у відповідності із законом зміни частоти сигналу ω_c , а також як систему стабілізації проміжної частоти на рівні ω_{pr0} . В останньому випадку як задавальна дія виступає частота ω_{pr0} , величиною, що керується – проміжна частота ω_{pr} , а збуджуючою дією, що викликає відхилення $\Delta\omega_{pr}$ проміжної частоти ω_{pr} від ω_{pr0} – зміна частоти ω_c сигналу, що надходить [6].

Під час настроювання ГКН можна встановити частоту $\omega_r = \omega_{r0}$, яка визначається з умови $\omega_{pr0} = \omega_{c0} - \omega_{r0}$, де ω_{c0} – середнє (номінальне) значення частоти сигналу, що приймається. Якщо $\omega_c = \omega_{c0}$, то проміжна частота на виході змішувача $\omega_{pr} = \omega_{c0} - \omega_{r0} = \omega_{pr0}$, тобто проміжна частота точно рівняється частоті настроювання (перехідній) частоті ЧД, $\Delta\omega_{pr} = 0$ і тому на виході ЧД напруга $u_{чд}(t) = 0$. Система знаходиться у стані рівноваги. Під час відхилення ω_c , тобто якщо $\omega_c = \omega_{c0} + \Delta\omega_c$ виникає зміна проміжної частоти на величину $\Delta\omega_c$, оскільки $\omega_{pr} = \omega_{pr0} + \Delta\omega_c$. Для схеми вимірювача розузгодження (ЧД) це означає, що виникає розузгодження $\Delta\omega_{pr} = \omega_{pr0} - [\omega_{pr0} + \Delta\omega_c] = -\Delta\omega_c$, тобто в момент зміни ω_c помилка системи складає $\Delta\omega_{pr} = -\Delta\omega_c$. За допомогою ЧД ця помилка $\Delta\omega_{pr}$ перетворюється у напругу $u_{чд}$, яка фільтрується і як напруга управління u_y надходить до керуючого елемента ГКН. Під впливом u_y частота ГКН змінюється на величину $\Delta\omega_r$: $\omega_r = \omega_{r0} + \Delta\omega_r$. Завдяки цьому проміжна частота ω_{pr} на виході ЗМ також змінюється, наближаючись до ω_{pr0} :

$$\omega_{pr}(t) = \omega_{c0} + \Delta\omega_c(t) - [\omega_{r0} + \Delta\omega_r(t)] = \omega_{pr0} + [\Delta\omega_c(t) - \Delta\omega_r(t)].$$

Дійсно, якщо до надходження u_y до ГКН $\Delta\omega_{pr} = \Delta\omega_c$, то після надходження u_y значення частотного розузгодження стане $\Delta\omega_{pr} = \Delta\omega_c - \Delta\omega_r$, тобто відхилення зменшилось на величину $\Delta\omega_r$. Оскільки в системі, що розглядається застосовується принцип управління за помилкою, то управляюча дія u_y формується з помилки системи $\Delta\omega_{pr}$, і, як наслідок, повністю усунути помилку неможливо [3].

Як підсумок, можна відзначити, що безпосередньо до складу ЧАП входять частотний дискримінатор (ЧД), що виконує функцію вимірювача розузгодження, фільтр нижніх частот (ФНЧ) і керуючий елемент (КЕ). Змішувач, підсилювач проміжної частоти і сам

гетеродин є типовими елементами класичної схеми супергетеродинного приймача з одноразовим перетворенням частоти.

4.6 Опис стенду

На рис. 4.2 наведена функціональна схема лабораторного стенду для дослідження системи частотного автопідстроювання і ЧАП.

У стенді пропонується дослідити варіант застосування ЧАП для стабілізації проміжної частоти супергетеродинного приймача.

Тракт супергетеродина з одноразовим перетворенням частоти реалізовано за допомогою змішувача ЗМ, гетеродина (генератор, що керується напругою) ГКН і підсилювача проміжної частоти, який в стенді реалізовано у вигляді двох підсилювачів ППЧ1 і ППЧ2. Частотне автопідстроювання в схемі реалізується за допомогою частотного дискримінатора ЧД_{пр}, перехідна частота якого обирається рівною центральній частоті смуги пропускання тракту проміжної частоти, фільтра нижніх частот ФНЧ і керуючого елементу КЕ, в якості якого використовується варикап підключений до контуру гетеродина ПК. Необхідно відзначити, що для того, щоб в системі, що досліджується, існував саме від'ємний зворотний зв'язок, частота сигналу повинна бути меншою за частоту гетеродина.

Для запобігання впливу вимірювальних приладів на результати дослідження, вимірювання миттєвого значення проміжної частоти і частоти гетеродина пропонується проводити за допомогою буферних каскадів які реалізовані як виткові повторювачі на польовому транзисторі і одно каскадного підсилювача радіочастоти. Вихідна напруга частотного дискримінатора, яка може бути виміряна за допомогою гнізда Х2, надходить до ФНЧ системи ЧАП.

За цього передбачено проведення ряд експериментів для дослідження характеристик ЧАП.

По-перше, за допомогою перемикача SA1 можливе безпосереднє вимірювання частоти вхідного сигналу, частоти гетеродина і миттєвого значення проміжної частоти на виході селективної системи тракту ПЧ. З метою оперативності проведення досліджень в стенд вбудовано цифровий частотомір на базі мікропроцесора PIC1684.

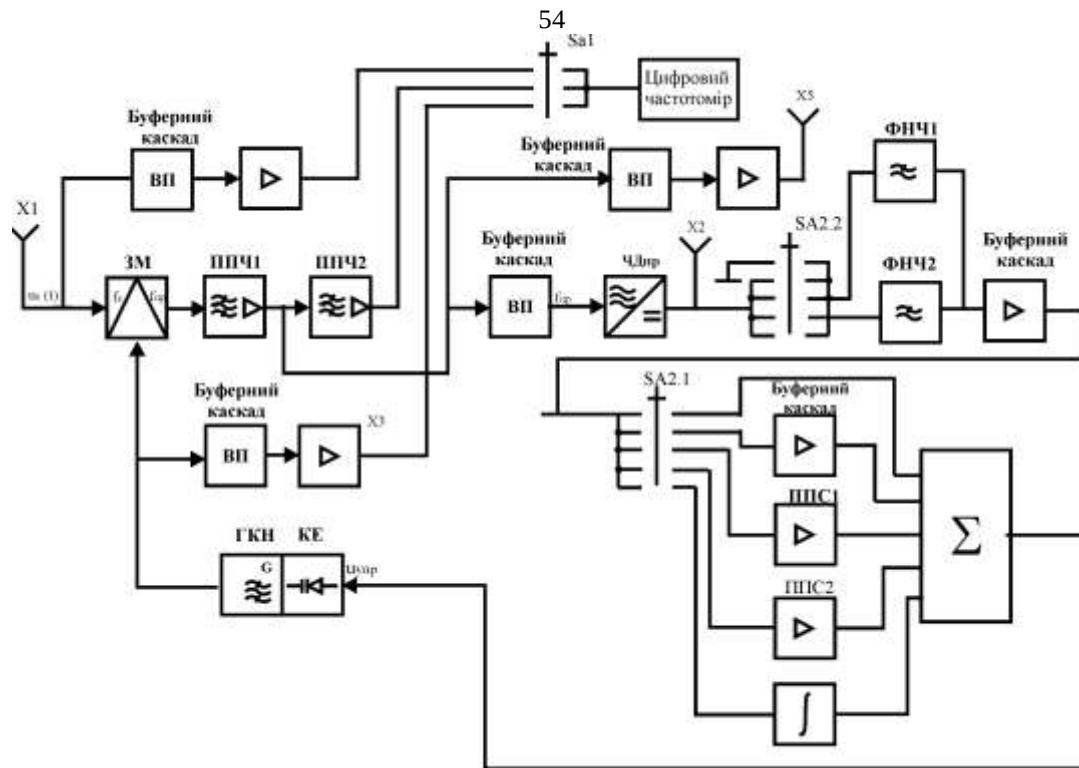


Рисунок 4.2 – Повна функціональна схема стенду

За допомогою перемикача SA2 проводиться вибір експерименту для визначення основних характеристик систем.

У першому положенні SA2 коло зворотного зв'язку системи ЧАП розімкнено і дослідженню підлягає статична детекторна характеристика ЧД. Також в цьому положенні проводиться вимірювання наскрізної частотної характеристики змішувача і ППЧ по основному каналу прийому для розімкненої системи ЧАП.

В другому положенні перемикача SA2 коло зворотного зв'язку замикається і вихідна напруга частотного дискримінатора безпосередньо надходить до ФНЧ системи ЧАП, тобто, контур регулювання замикається і система набуває класичного вигляду статичної системи ЧАП (з астатизмом нульового порядку). Буферні каскади після ФНЧ не змінюють коефіцієнт передачі по контуру регулювання, оскільки коефіцієнт передачі з напруги цих каскадів рівняється одиниці, необхідність їх включення пояснюється проведенням експериментів з для інших положень перемикача.

Утворений на виході ФНЧ сигнал через буферні каскади і суматор як напруга управління поступає до керуючого елементу ЧАП. Для вимірювання остаточного розстроювання проміжної частоти відносно номінального у замкненому стані ЧАП (це і є наскрізна характеристика системи стабілізації проміжної частоти):

$$\Delta f_{\text{ост}} = F(\Delta f_{\text{вх}})$$

спочатку аналогічно попередньому варіанту необхідно виставити частоту вхідного сигналу $f_{\text{вх}} = f_{\text{осн}}$. За цього вихідна напруга ЧД повинна рівнятися нулю. Після цього змінюючи частоту ГЗ-112 у бік більших значень частоти порівняно з частотою основного каналу провести вимірювання характеристики $f_{\text{пр}} = F(f_{\text{вх}})$.

Через гістерезисні властивості систему ЧАП частоту вимірювального генератора необхідно спочатку змінювати від малих значень розладів відносно частоти основного каналу у бік великих розладів, а потім навпаки повертатися від великих частотних розладів до малих. Границі зміни частоти обрати такими, щоб отримати необхідні дані для визначення смуги захоплення і смуги утримання.

В третьому стані перемикача SA2 досліджується вплив коефіцієнта передачі по контуру регулювання на основні характеристики ЧАП. Так, в третьому положенні перемикача SA2

коло зворотного зв'язку також замкнено, але вихідна напруга частотного дискримінатора після фільтрації в ФНЧ підсилюється за допомогою підсилювача постійного струму ППС1. Фільтр кільця ЧАП залишається той же самий, що і другому положенні SA2. Додатковий ППС1 збільшує загальний коефіцієнт передачі по контуру регулювання і дозволяє дослідити характеристики системи ЧАП аналогічно попередньому пункту (коефіцієнт автопідстроювання, смуги захвату і утримання) для збільшеного значення загального коефіцієнта передачі по контуру К.

В четвертому положенні перемикача SA1 коло зворотного зв'язку також замкнено, і функціональна схема такого варіанту ЧАП тотожна класичній статичній ЧАП, яка досліджується у попередньому випадку. Але замість одноланкового RC-фільтра в коло регулювання включається трьохланковий ФНЧ, що суттєво збільшує фазовий набіг у колі зворотного зв'язку. Відомо, що одноланковий RC-фільтр надає фазовий зсув, який асимптотично устремляється до -90° , а три послідовно ввімкнені RC-ланки нададуть фазовий зсув, який асимптотично устремляється до -270° . Таким чином, для кола зворотного зв'язку фазовий зсув перевищує -180° , тобто виконується умова балансу фаз для втрати стійкості. Для виконання умови балансу амплітуд у цьому положенні перемикача також збільшено коефіцієнт передачі по контуру регулювання за допомогою підсилювача постійного струму ППС2.

Таким чином, включення до контуру регулювання багатоланкового RC-фільтра і ППС2 дозволяє дослідити ЧАП в режимі самозбудження. Під час самозбудження системи ЧАП виникає частотна модуляція напруги проміжної частоти. На виході ППЧ коливання з частотною модуляцією через наявність резонансних контурів перетворюються в коливання з амплітудно-частотною модуляцією. Амплітудна модуляція дозволяє за допомогою осцилографа, підключеного до виходу ППЧ проконтролювати режим системи ЧАП.

В п'ятому положенні перемикача SA1 досліджується система ЧАП з астатизмом першого порядку. Як відомо, для системи з регулюванням за помилкою, астатизму першого порядку можливо досягнути, якщо в контур регулювання включити інтегратор сигналу помилки. Тому введення ідеального інтегратора до контуру регулювання послідовно з ФНЧ дозволить реалізувати систему ЧАП з

астатизмом першого порядку. Для такої системи помилка регулювання для задаючої дії у вигляді константи буде рівнятися 0, а для задаючої дії у вигляді лінійної функції часу матиме кінцеве значення.

Приймальний тракт супергетеродинного приймача реалізовано на базі мікросхеми K174XA2, яка представляє собою ІМС 3-го ступеню інтеграції і містить 34 транзистора, 21 діод і 57 резисторів. Електричні параметри ІМС K174XA2 наведені в таблиці 4.1 [13].

Таблиця 4.1 – Електричні параметри ІМС K174XA2

Номінальна напруга живлення	9В
Струм живлення при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не більше	16мА
Відношення сигнал-шум при $U_{жив} = 9В$, $f_{вх} = 1$ МГц, $U_{BX}=10$ мкВ, $m = 0,8$, $T = +25^{\circ}C$, не більше	24дБ
Вихідна напруга низької частоти при $U_{жив} = 9В$, $f_{вх} = 1$ МГц, $f_{пч} = 465$ кГц, $f_m = 1$ кГц, $m = 0,8$, $T = +25^{\circ}C$: при $U_{BX} = 20$ мкВ, не менш при $U_{BX} = 5 \cdot 10^5$ мкВ	60мВ 100...560мВ
Зміна вихідної напруги низької частоти при зміні напруги джерела живлення в діапазоні 4,8...9В при $f = 1$ МГц, $f_m = 1$ кГц, $m = 0,3$, $U_{BX} = 10$ мкВ, $T = +25^{\circ}C$, не більше	6дБ
Максимальне значення частоти вхідного сигналу при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не менш	27МГц
Коефіцієнт гармонік при $U_{жив} = 9В$, $f_{вх} = 1$ МГц, $f_{пч} = 465$ кГц, $f_m = 1$ кГц, $m = 0,8$, $T = +25^{\circ}C$, не більш: при $U_{BX} = 5 \cdot 10^5$ мкВ при $U_{BX} = 3 \cdot 10^4$ мкВ	10% 8%
Вхідний опір ППЧ при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не менш	3кОм
Вхідний опір ПРЧ при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не менш	3кОм
Вихідний опір ППЧ при $U_{жив} = 9В$, $T = +25^{\circ}C$, не менш	30кОм

З технічних даних випливає, що ІМС К174ХА2 призначена для реалізації радіочастотного тракту супергетеродинного приймача і дозволяє реалізувати прийом радіостанцій з амплітудною модуляцією і з максимальним значенням частоти вхідного сигналу до 30 МГц.

Ця мікросхема містить такі функціональні вузли: підсилювач радіочастоти, балансний змішувач, гетеродин і підсилювач проміжної частоти з системою автоматичного регулювання підсилення. Функціональна схема мікросхеми і типова схема підключення зображені на рис.4.3.

Оскільки мікросхема включає основну частину трактів сигнальної і проміжної частоти, то на її підставі досить легко реалізувати систему ЧАП.

Відповідно до рис. 4.3 для реалізації ЧАП до схеми приймального тракту достатньо додати частотний дискримінатор і керуючий елемент і замкнути коло зворотного зв'язку.

Система ЧАП для стабілізації проміжної частоти в приймачах радіомовлення, як правило, застосовується в діапазоні УКХ для прийому сигналів з частотною модуляцією зі стандартним значенням проміжної частоти $f_{\text{пр0}}=10,7$ МГц. Але, в лабораторному практикумі як джерело вхідного сигналу використовується вимірювальний генератор ГЗ-112 з максимальною робочою частотою 10 МГц, а максимальна частота вхідного сигналу для 174ХА2 не повинна перевищувати 27 МГц, що не відповідає діапазону УКХ.

Відповідно реалізувати ЧАП в стандартному УКХ діапазоні з таким генератором на базі мікросхеми 174ХА2 не представляється можливим, а реалізація системи частотного автопідстроювання для стандартного значення проміжної частоти $f_{\text{пр}}=465$ кГц, яке характерне для приймачів з амплітудною модуляцією буде неефективним з точки зору проведення експериментів з дослідження ЧАП.

Підсилювач радіочастоти, змішувач і гетеродин мікросхеми К174ХА2 можуть працювати і з більш високочастотними сигналами (80...90 МГц), а підсилювач ПЧ забезпечує достатнє підсилення сигналів тільки у діапазоні до 4...5 МГц.

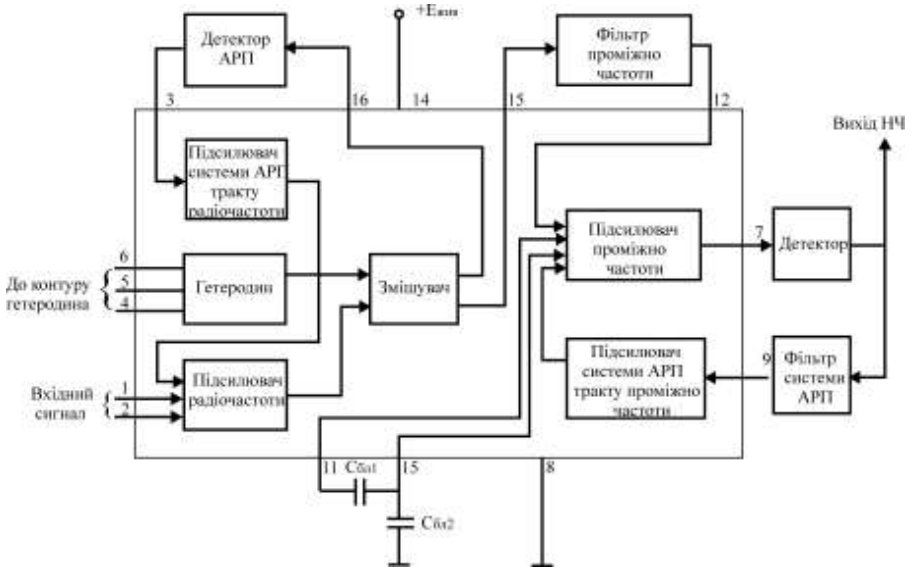


Рисунок 4.3 – Функціональна схема супергетеродинного приймача на базі ІМС 174ХА2

Тому в схемі стенду пропонується використовувати мікросхему не в типовому режимі зі значенням проміжної частоти $f_{\text{пр}}=465$ кГц, а збільшити значення проміжної частоти приймального тракту до 4,5 МГц. Таке використання мікросхеми цілком можливе для потреб лабораторної роботи.

У такому разі можна застосувати класичну схему ЧАП з типовими варіантами реалізації частотних дискримінаторів, які використовуються, для типових значень проміжної частоти (6,5 МГц або 10,7 МГц).

Базова функціональна схема системи ЧАП стенду із застосуванням К174ХА2, яка повністю відповідає класичній схемі ЧАП рис.1.1, представлена на рис. 4.4.

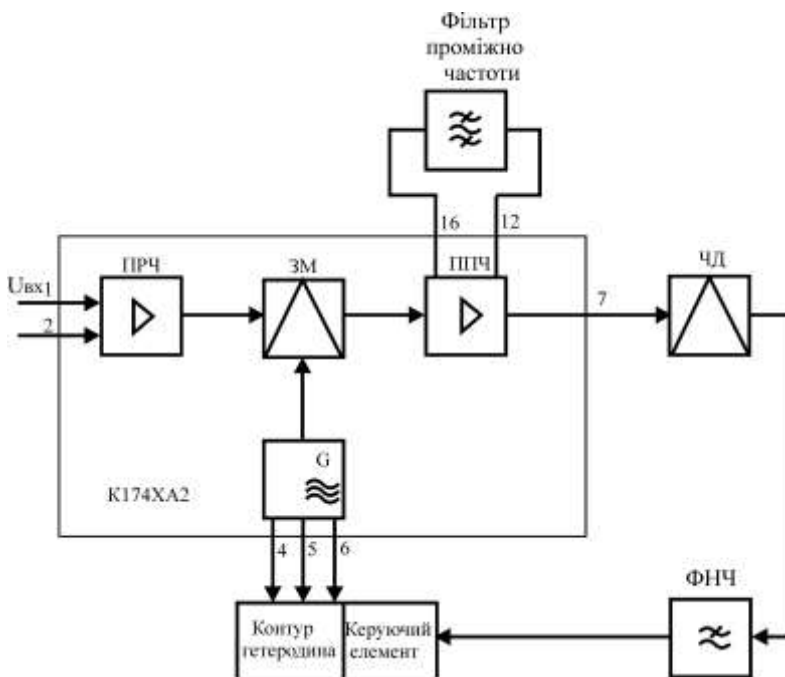


Рисунок 4.4 – Функціональна схема ЧАП на підставі мікросхеми К174ХА2

З метою розширення функціональних можливостей проведення експериментів з дослідження характеристик ЧАП смугу пропускання тракту проміжної частоти обираємо більшу (300 кГц) за номінальне значення, яку забезпечують стандартні п'єзокерамічні фільтри. Крім того, обране значення проміжної частоти $f_{np}=4,5$ МГц відрізняється від середнього значення смуги пропускання стандартних фільтрів.

Оскільки для цілей лабораторної роботи питання селективності тракту ПЧ (по сусідньому каналу) не критичне, фільтр проміжної частоти пропонується реалізувати на підставі двох зв'язаних контурів (рис.4.5).

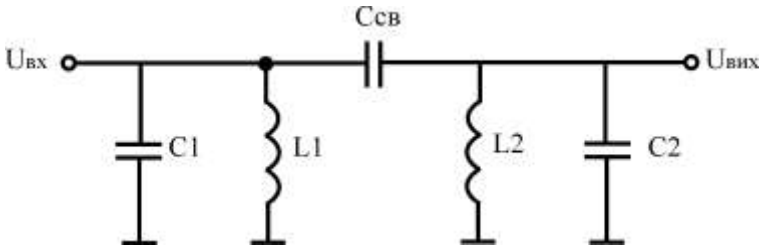


Рисунок 4.5 – Фільтр тракту проміжної частоти

Для частотного дискримінатора пропонується реалізувати схему класичного дробового детектора, як пристрою який найбільш часто використовувався в схемах радіомовних приймачів.

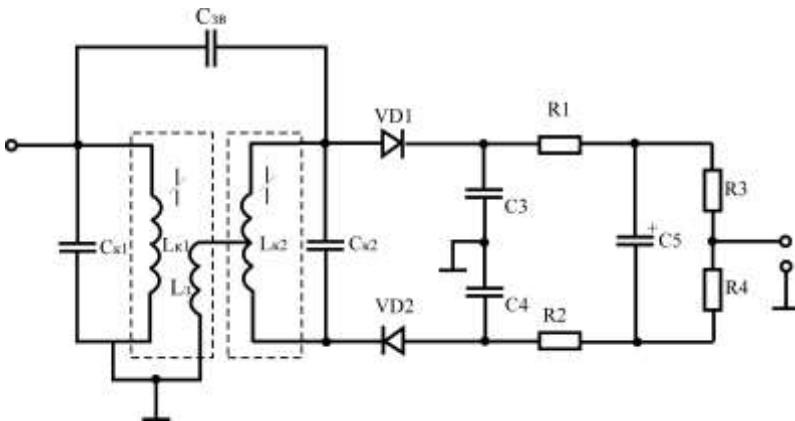


Рисунок 4.6 – Частотний дискримінатор

Постійна складова струму обох діодів протікає по нерозгалуженому колу $VD1$, $L_{к2}$, $VD2$, $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ утворюючи напругу на резисторах $R3$, $R4$. Через велике значення сталої часу кола $R3$, $R4$, $C5$ напруга на ємності $U_{C5}=U_0$ з великим ступенем інерційності зберігається рівною середньому значенню сигналу.

Відповідно, якщо змінюється амплітуда вхідного сигналу, то змінюються кути відсікання струмів і, відповідно, вхідні опори

діодних детекторів. Тому амплітудна модуляція придушується через різне шунтування контурів детектора в залежності від амплітуди сигналу.

Так, при збільшенні амплітуди $\cos\theta$ зменшується, кут відсікання струму кожного діода збільшується, вхідні опори діодних детекторів зменшуються і більше шунтують контури перетворювача виду модуляції. І, навпаки, за зменшенням амплітуди вхідного сигналу контури менш шунтуються вхідними опорами діодних детекторів.

Для запобігання можливої перекомпенсації амплітудних змін звичайно підключають резистори з невеликим опором R_1 , R_2 , які не зашунтовані великою ємністю C_5 .

Змінні складові струмів протікають по колам VD_1 , L_{k2} , L_3 , C_3 і VD_2 , C_4 , L_3 , L_{k2} , утворюючи на конденсаторах C_3 , C_4 напруги звукових частот u_{c3} u_{c4} . Під час зміни частоти вхідного сигналу співвідношення між u_{c1} u_{c2} змінюються, але сумарне значення ($u_{c3}+u_{c4}$) залишається незмінним. Тому цей детектор називають детектором відношень або дробовий детектор.

Вихідна напруга знімається між точками з'єднання C_3 , C_4 і R_3 , R_4 і визначиться як:

$$U=u_{C3}-u_{C4}=u_{C3}-0,5 U_0.$$

Оскільки $U_0= u_{c3} +u_{c4}$, то з останнього рівняння випливає, що в дробовому детекторі $U_{вих}$ в два рази менше порівняно зі схемою балансного частотно-фазового детектора. Суміщення функцій обмежувача і частотного детектора спрощує схемотехнічну реалізацію, але розділення цих функцій дозволяє отримати більшу якість як обмеження, так і детектування. Принципова особливість схеми дробового детектора від класичної схеми є деяка зміна в реалізації фазозсуваючого трансформатора. Оскільки в транзисторному варіанті з метою досягнення мініатюризації котушки індуктивності L_{k1} , L_3 і L_{k2} виконуються в окремих екранах, то електромагнітний зв'язок між первинним і вторинним контурами фазозсуваючого трансформатора досягається за допомогою конденсатора зв'язку $C_{зв}$ невеликої ємності.

Як фільтр нижніх частот контуру регулювання відповідно до функціональної схеми рис.10.2 використовується звичайний RC-фільтр першого порядку.

Відповідно до функціональної схеми стенду рис. 4.2 для проведення експериментів необхідно реалізувати фрагмент функціональної схеми, який дозволяє змінювати коефіцієнт передачі по контуру регулювання, а також реалізувати операцію інтегрування сигналу помилки (рис.4.7).

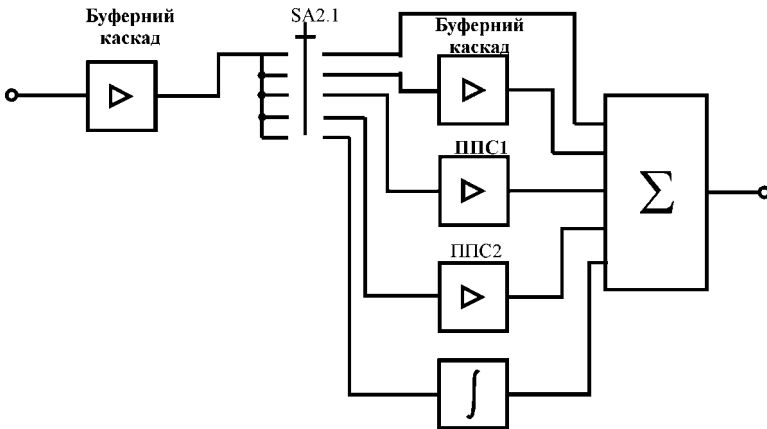


Рисунок 4.7 – Фрагмент функціональної схеми для дослідження системи ЧАП

Операцію інтегрування пропонується реалізувати на базі схеми ідеального інтегратора з використанням операційного підсилювача. Ідеальний інтегратор на ОП реалізується, як правило, для інвертуючого включення ОП (рис. 4.8).

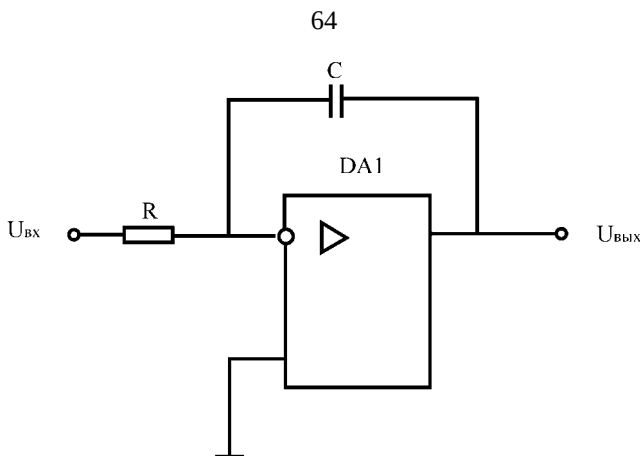


Рисунок 4.8 – Ідеальний інтегратор з використанням ОП

Для того, щоб фаза сигналу помилки не змінювалася порівнянно з класичним варіантом ЧАП без інтегратора, перед інтегратором необхідно включити інвертуючий повторювач напруги, який і виконує функцію буферного каскаду відповідно до функціональної схеми рис.4.1, і рис.4.5. Тоді принципову схему частини стенду, яка реалізує фрагмент функціональної схеми (рис.11.5) можна подати у такому вигляді (рис.4.9).

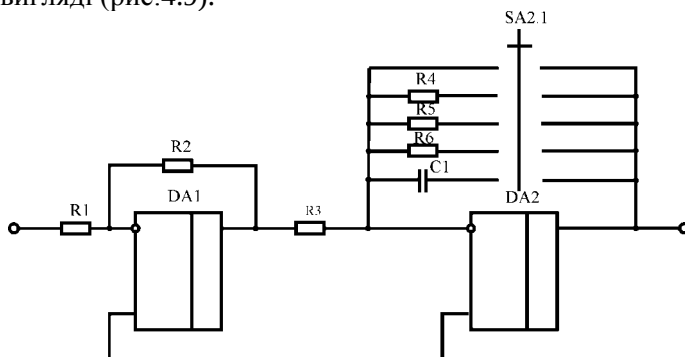


Рисунок 4.9 – Принципова схема тракту сигналу помилки

Принципова схема базової частини стенду із застосуванням класичної статичної системи ЧАП зображена на рис.4.10.

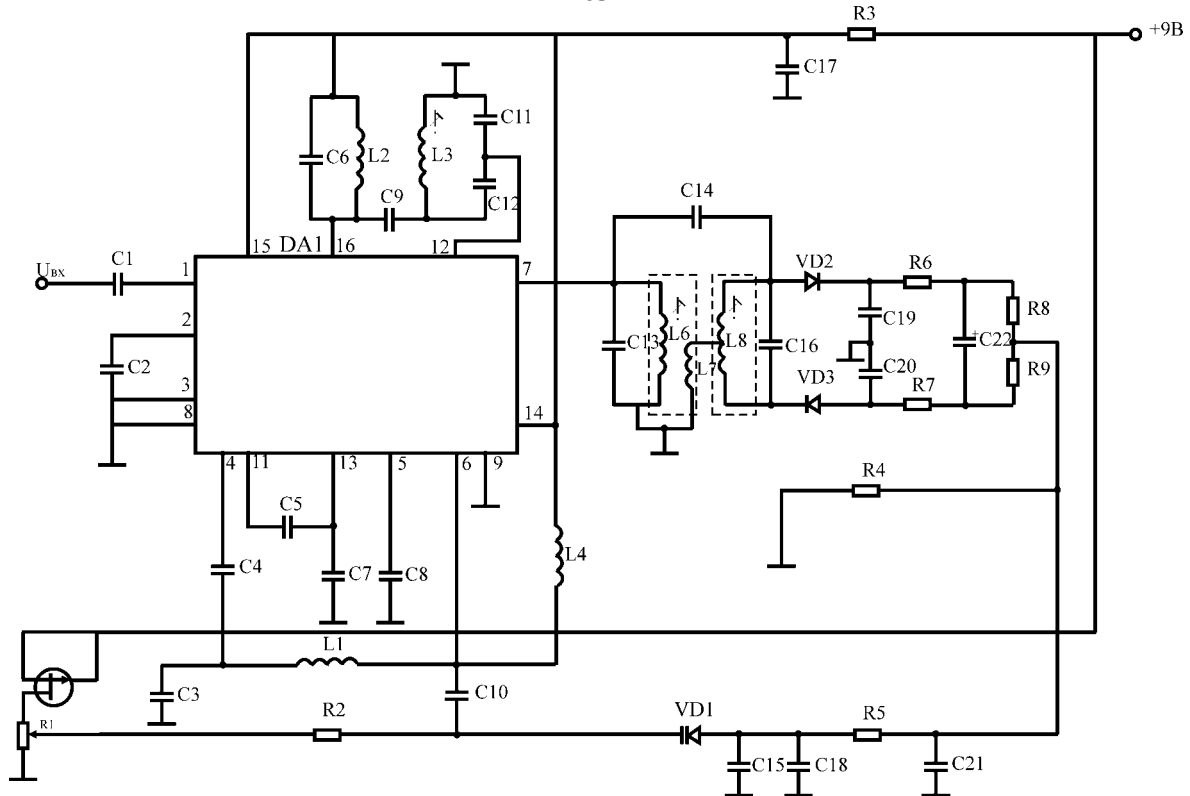
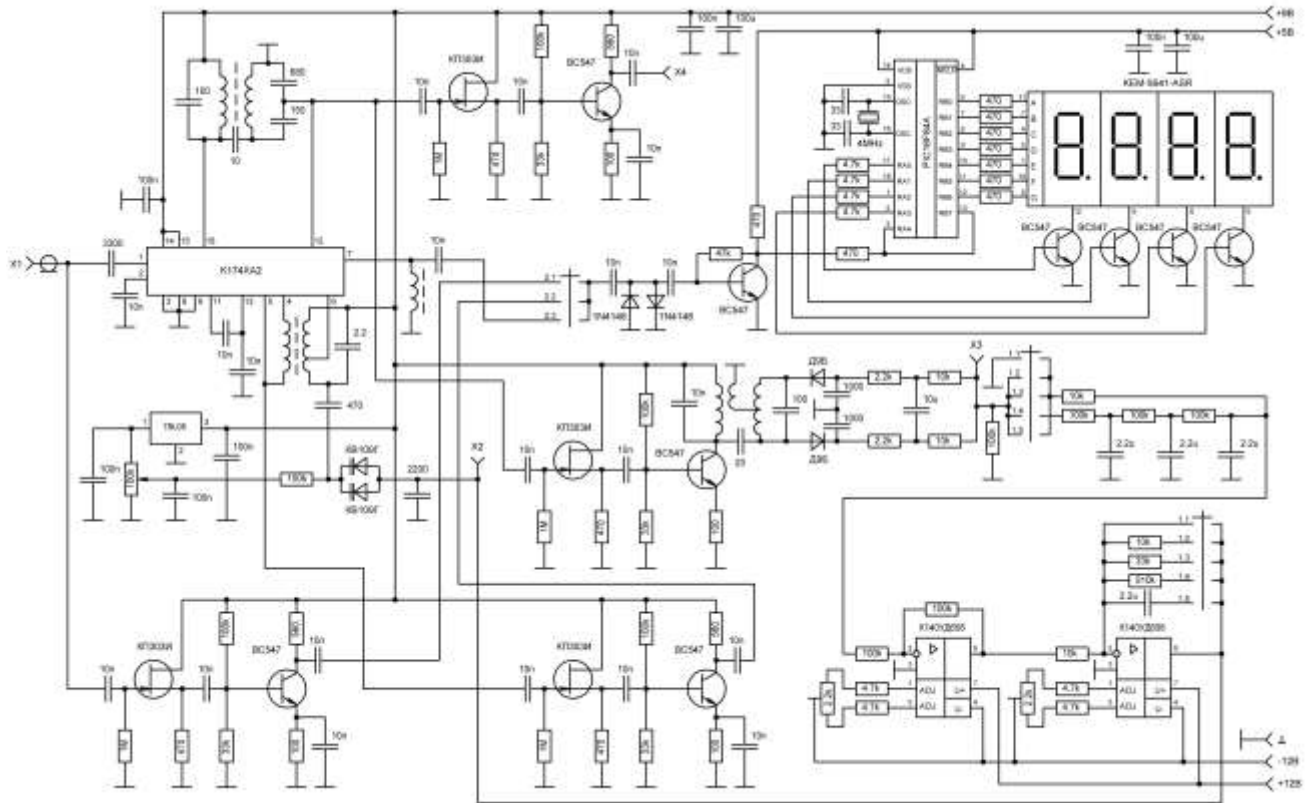


Рисунок 4.10 – Базова схема системи ЧАП



4.7 Експериментальна частина

1. Ввімкнути станд. Встановити амплітуду сигналу від вимірювального генератора ГЗ-112 100 мВ, частоту сигналу $f \approx 1,5$ МГц.

2. Перемикачі на стенді встановити в такі положення: SA1-1 (система ЧАП розімкнена), SA2-в положення 2 (вихід частотоміра підключено через буферний каскад підключено до вихідного підсилювача тракту проміжної частоти ППЧ2).

3. Провести вимірювання статичної детекторної характеристики частотного дискримінатора.

Спочатку необхідно настроїти вимірювальний генератор на частоту основного каналу прийому. Подати сигнал від вимірювального генератора ГЗ-112 до входу стенда (коаксіальне гніздо X1). Підключити вольтметр постійного струму до виходу частотного дискримінатора (гніздо X2). Осцилограф підключити до коаксіального гнізда X3 (здійснюється контроль сигналу проміжної частоти на виході ППЧ1).

Змінюючи частоту вхідного сигналу $f_{вх}$ від ГЗ-112 в діапазоні 1...2 МГц і контролюючи напругу вольтметром постійного струму на виході ЧД_{пр} фіксують значення частоти ГЗ-112 для якого напруга на виході дискримінатора стане рівною нулю (). Одночасно фіксується миттєве значення проміжної частоти.

Зафіксовані частоти вимірювального генератора ГЗ-112 і тракту проміжної частоти відповідають частоті основного каналу прийому $f_{осн}$ і центральній частоті смуги пропускання тракту проміжної частоти $f_{пр0}$ а, оскільки для значення $f_{пр0}$ вихідна напруга ЧД_{пр} рівняється нулю, то $f_{пр0}$ рівняється також перехідній частоті дискримінатора $f_{пер}$.

Після цього змінюючи частоту ГЗ-112 як у бік більших значень частоти, так і менших значень порівняно з частотою основного каналу, провести вимірювання дискримінаційної характеристики ЧД_{пр} - $U_{вихЧД} = F(\Delta f)$, де $\Delta f = f_{пр} - f_{пер}$.

За результатами експерименту визначити коефіцієнт передачі ЧД (крутість детекторної характеристики на ліній ділянці):

$$K_{ЧД} = \left. \frac{dU_{вихЧД}}{d(\Delta f)} \right|_{\Delta f=0} \approx \frac{\Delta U_{вихЧД}}{\delta(\Delta f)}$$

4. Провести вимірювання наскрізної характеристики тракту ПЧ при розімкненому колі системи ЧАП.

Повторити настроювання ГЗ-112 на частоту основного каналу прийому. Переконалися, що напруга на виході вольтметра постійного струму рівняється нулю. Зафіксувати номінальне значення проміжної частоти $f_{\text{пр}0}$ (друге положення перемикача SA2). Також зафіксувати номінальне значення частоти вхідного сигналу (третє положення перемикача SA2).

Після цього повільно змінюючи частоту ГЗ-112 як у бік більших значень частоти ρ з кроком , так і менших значень порівняно з частотою основного каналу провести вимірювання наскрізної характеристик $f_{\text{пр}}=F(f_{\text{вх}})$.

Отримані експериментальні результати потім надаються у вигляді звичному для систем регулювання як:

$$\Delta f_{\text{пр}}=F(\Delta f_{\text{вх}}),$$

де $\Delta f_{\text{вх}}=f_{\text{вх}}-f_{\text{осн}}$, $\Delta f_{\text{пр}}=f_{\text{пр}}-f_{\text{пр}0}$.

5. Провести вимірювання характеристики регулювання ГКН.

Частоту вхідного сигналу від ГЗ-112 встановити рівній номінальній $f_{c0} \approx 1,5$ МГц. Перевести перемикач SA1 в положення 2 (коло зворотного зв'язку системи ЧАП замикається), а перемикач SA1 в положення 1 (в цьому положенні цифровий частотомір підключається через буферний каскад до гетеродина приймача). Вольтметр постійного струму залишити підключеним до гнізда X2.

Відповідно до функціональної схеми стенда у другому положенні SA1 коло зворотного зв'язку ЧАП замкнено і вихідний сигнал ЧД через ФНЧ і буферний каскад надходить до керуючого елементу. Враховуючи, що коефіцієнт передачі ФНЧ у смузі пропускання можна прийняти рівним 1, а буферний каскад також має одиничний коефіцієнт підсилення з напруги, то чисельне значення вихідної напруги ЧД в усталеному режимі може розглядатися, як напруга управління для керуючого елемента системи ЧАП.

Повільно змінюючи частоту ГЗ-112 як у бік більших значень так і у бік менших значень частоти з кроком для кожного значення частоти гетеродина зафіксувати значення вихідної напруги вольтметра постійного струму, яке можна розглядати як напругу управління $U_{\text{упр}}$,

і відповідне значення частоти гетеродина f_r . За результатами експеримента побудувати залежність

$$f_r = F(U_{\text{упр}}).$$

За характеристикою регулювання визначити коефіцієнт передачі ГКН, як:

$$K_{\text{ГКН}} = \frac{d(f_r)}{d(U_{\text{упр}})} \Big|_{U_{\text{упр}}=0} \approx \frac{\delta(f_r)}{\Delta U_{\text{упр}}}$$

6. За результатами експериментів і розрахунків, проведених у пунктах 3,5, обчислити значення коефіцієнта автопідстроювання статичної системи ЧАП:

$$K = 1 + K_{\text{чд}} \cdot K_{\text{ГКН}}.$$

7. Провести вимірювання наскрізної характеристики системи ЧАП при замкненому колі регулювання.

Перемикач SA1 залишити у положенні 2, а осцилограф підключеним до коаксіального гнізда X3.

Провести настроювання на частоту основного каналу прийому. (вихідна напруга вольтметра постійного струму рівняється нулю, миттєве значення проміжної частоти рівняється номінальному $f_{\text{пр}} = f_{\text{пр0}} = 4,5$ МГц (контроль проводиться у другому положенні перемикача SA2.) і миттєве значення частоти вхідного сигналу рівняється номінальному (контроль проводиться у третьому положенні перемикача SA2.).

Повільно змінюючи частоту вхідного сигналу у бік більших значень частоти з кроком приблизно 50 кГц для кожного поточного значення частоти ГЗ-112 зафіксувати миттєві значення проміжної частоти (друге положення перемикача SA2) і частоти вхідного сигналу (третє положення перемикача SA2). Переконалися, що через дію системи ЧАП відхилення проміжної частоти від номінального стає меншим порівняно з відхиленням частоти вхідного сигналу від номінального. Це означає, що система ЧАП знаходиться в режимі утримання і відбувається зменшення початкового частотного розладу.

Продовжувати збільшення частоти вхідного сигналу з тим же кроком до частоти на якій відбудеться зрив режиму утримання. Цей момент досить легко від слідкувати за допомогою осцилографа в момент зникнення або суттєвого зменшення амплітуди коливання на виході тракту проміжної частоти. Це означає, що система ЧАП вийшла за межі смуги утримання і функціонування ЧАП при таких частотних розладах неможливе. Визначене значення частоти вхідного сигналу відповідає правій межі смуги утримання $f_{\text{утр}2}$.

Продовжити збільшення частоти вхідного сигналу ще для двох частотних точок. Переконалися, що відхилення проміжної частоти від номінального значення практично рівняється відхиленню частоти вхідного сигналу від номінального.

Тепер змінити напрям зміни частоти і від останньої частотної точки (за межами смуги утримання) почати зменшення частоти сигналу від ГЗ-112 з відповідною фіксацією частотоміром миттєвих значень проміжної частоти і частоти вхідного сигналу. **Звернути увагу, що під час зменшення частоти в момент проходження значення частоти вхідного сигналу, яке відповідало правій межі смуги утримання $f_{\text{утр}2}$ повернення до нормального функціонування системи ЧАП не відбувається.**

Продовжуючи зменшення частоти вхідного сигналу відзначити частоту для якої спостерігається включення системи ЧАП з відповідним зменшенням помилки (відхилення миттєвого значення проміжної частоти відносно номінального). Отримане значення частоти вхідного сигналу відповідає правій межі смуги захоплення $f_{\text{зах}2}$.

Продовжити процес вимірювання до частоти вхідного сигналу, яка відповідає номінальному значенню частоти f_{c0} (значення проміжної частоти рівняється номінальному). Тепер повторити вимірювання для частот вхідного сигналу менших за f_{c0} , тобто у бік зменшення частоти від ГЗ-112 відносно номінального.

Аналогічно для кожної частотної точки зафіксувати значення миттєвої частоти вхідного сигналу (положення 3 перемикача SA2) і миттєвого значення проміжної частоти (положення 2 перемикача SA2). Вимірювання проводити до моменту, коли відбудеться зрив або суттєве зменшення амплітуди коливань на виході тракту ПЧ (контроль здійснюється за допомогою осцилографа). Отримане значення частоти відповідає лівій межі смуги утримання $f_{\text{утр}1}$. Продовжити зменшення

частоти для двох частотних точок. Переконалися, що частотний розлад проміжної частоти практично рівняється частотному розладу вхідного сигналу.

Тепер знову змінити напрям зміни частоти і від останньої частотної точки (за межами смуги утримання) почати збільшення частоти сигналу від ГЗ-112 з відповідною фіксацією частотоміром миттєвих значень проміжної частоти і частоти вхідного сигналу. **Звернути увагу, що під час збільшення частоти в момент проходження значення частоти вхідного сигналу, яке відповідало лівій межі смуги утримання $f_{\text{утр1}}$ повернення до нормального функціонування системи ЧАП не відбувається.**

Продовжуючи збільшення частоти вхідного сигналу відзначити частоту для якої спостерігається включення системи ЧАП з відповідним зменшенням помилки (відхилення миттєвого значення проміжної частоти відносно номінального). Отримане значення частоти вхідного сигналу відповідає лівій межі смуги захоплення $f_{\text{зах1}}$.

Отримані експериментальні результати надати у вигляді звичному для систем регулювання як:

$$\Delta f_{\text{пр}} = F(\Delta f_{\text{вх}}),$$

де $\Delta f_{\text{вх}} = f_{\text{вх}} - f_{\text{осн}}$, $\Delta f_{\text{пр}} = f_{\text{пр}} - f_{\text{пр0}}$.

Якщо вимірювання проведені коректно, то наскрізна характеристика повинна мати вигляд, який зображено на рис. 4.11.

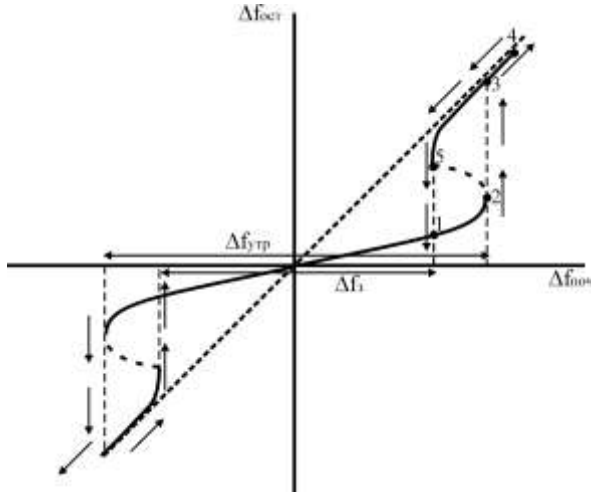


Рисунок 4.11 – Характеристика регулювання ЧАП

Штрих-пунктирна пряма (бісектриса) відповідає розімкненому контуру регулювання. Як видно з рис.4.8 характеристика регулювання ЧАП має неоднозначність (гістерезис) для значень $\Delta f_3 < \Delta f_{\text{поч}} < \Delta f_{\text{утр}}$. На цьому інтервалі характеристика регулювання відмічена штриховою лінією, оскільки це область нестійкого стану для якої неможливо реалізувати положення ЧАП, яке фізично реалізується.

За побудованою наскрізною характеристикою регулювання системи ЧАП визначити:

- 1) смугу утримання як $\Delta f_{\text{утр}} = f_{\text{утр2}} - f_{\text{утр1}}$;
- 2) смугу захоплення як $\Delta f_3 = f_{32} - f_{31}$;
- 3) коефіцієнт автопідстроювання як:

$$K_{\text{АПЧ}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{ост}}}$$

Порівняти значення $K_{\text{АПЧ}}$ з результатами теоретичного розрахунку отриманого у пункті 6.

8. Провести дослідження впливу значення коефіцієнта передачі по контуру регулювання на характеристики системи ЧАП.

Переключити перемикач SA1 у третє положення. При цьому в контур регулювання включається додатковий підсилювач постійного струму з коефіцієнтом підсилення з напруги $K_U=3$.

Повторити вимірювання наскрізної характеристики для нового значення коефіцієнта підсилення по контуру регулювання.

За побудованою наскрізною характеристикою регулювання системи ЧАП визначити:

- 1) смугу утримання як $\Delta f_{\text{утр}} = f_{\text{утр}2} - f_{\text{утр}1}$;
- 2) смугу захоплення як $\Delta f_3 = f_{32} - f_{31}$;
- 3) коефіцієнт автопідстроювання як:

$$K_{\text{АПЧ}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{ост}}}.$$

Порівняти значення отриманих параметрів з результатами отриманими у пункті 7. Зробити висновок про вплив коефіцієнта передачі по контуру регулювання на характеристики ЧАП.

9. Дослідити ЧАП в режимі втрати стійкості.

Перевести перемикач SA1 в четверте положення. При такому положенні перемикача в контур регулювання замість ФНЧ першого порядку включено ФНЧ третього порядку, який може теоретично привнести фазовий набіг по контуру зворотного зв'язку -270° , тобто перевести від'ємний зворотний зв'язок у додатний. Таким чином, якщо для кола зворотного зв'язку фазовий зсув перевищує -180° , то виконується умова балансу фаз для втрати стійкості. Для виконання умови балансу амплітуд у цьому положенні перемикача також збільшено коефіцієнт передачі по контуру регулювання за допомогою додаткового підсилювача постійного струму ППС2 з наскрізним коефіцієнтом підсилення $K_U \approx 23$.

Таким чином, включення до контуру регулювання багатоланкового RC-фільтра і ППС2 дозволяє дослідити ЧАП в режимі самозбудження. Під час самозбудження системи ЧАП виникає частотна модуляція напруги проміжної частоти. На виході ППЧ коливання з частотною модуляцією через наявність резонансних контурів перетворюються в коливання з амплітудно-частотною модуляцією. Амплітудна модуляція дозволяє за допомогою

осцилографа, підключеного до виходу ППЧ проконтролювати режим системи ЧАП.

Проконтролювати епюри коливань на виході тракту проміжної частоти для декількох значень частоти вхідного сигналу.

10. Повернути частоту вхідного сигналу від Г№-112 до номінальної частоти основного каналу прийому $f=f_{c0}$. Перемикач SA1 перевести у п'яте положення. При цьому в контур регулювання замість підсилювача постійного струму вмикається інтегратор на операційному підсилювачі. Оскільки інтегратор реалізовано в інвертуючому включенні, то для того щоб фаза сигналу помилки не інвертувалася, перед інтегратором включено інвертуючий повторювач напруги з коефіцієнтом передачі -1.

Повторити вимірювання наскрізної характеристики системи ЧАП аналогічно пунктам 7,8. Переконатися, що у такому варіанті система ЧАП у межах смуги утримання має нульове значення помилки. Оскільки в контурі регулювання присутній один інтегратор, то запропонована система репрезентує систему з управлінням за помилкою з астатизмом першого порядку.

За побудованою наскрізною характеристикою регулювання системи ЧАП визначити:

- 1) смугу утримання як $\Delta f_{\text{утр}} = f_{\text{утр}2} - f_{\text{утр}1}$;
- 2) смугу захоплення як $\Delta f_3 = f_{32} - f_{31}$.

4.8 Контрольні запитання

1. Принцип дії системи частотного автопідстроювання.
2. Характеристики системи ЧАП. Смуга утримання і смуга захоплення.
3. Функціональна схема системи ЧАП для стабілізації проміжної частоти супергетеродинного приймача.
4. Структурна схема статичної системи ЧАП лабораторного стенду.
5. Визначення передавальної функції помилки контуру ЧАП у варіанті статичної системи.
6. Функції ФНЧ в системі ЧАП.
7. Функціональна схема ЧАП з астатизмом першого порядку.
8. Структурна схема ЧАП з астатизмом першого порядку.

9. Визначення передавальної функції помилки контуру ЧАП у варіанті астатичної системи. першого порядку.
10. Використання системи ЧАП в якості слідкуючого фільтра, якщо інформація закладена в амплітуді вхідного сигналу. Використання системи ЧАП в якості слідкуючого фільтра, якщо інформація закладена в частоті вхідного сигналу.
11. Алгоритм роботи ГКН системи ЧАП.
12. Частотні дискримінатори системи ЧАП. Типова статична детекторна характеристика.
13. Перехідні процеси в системі ЧАП.
14. Нелінійний режим роботи системи ЧАП.
15. Як оцінити стійкість системи ЧАП?

4.9 Література

1. Первачев О.В. Радиоавтоматика. – М.: "Радио и связь", 1982. – 294 с.
2. Радиоавтоматика. Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: "Высшая школа", 1985. – 270 с.
3. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств / Белкин М.К., Белинский Б.Т., Мазор Ю.Л., Терещук Р.М. – Киев: "Вища школа", 1982. – 477 с.
4. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. – М: "Высшая школа", 1990. – 135 с.
5. Буга Н.Н., Фалько А.Н., Чистяков Н.И. Радиоприемные устройства: Учебник для вузов. – М.: "Радио и связь", 1986. – 320 с.