

Министерство образования Российской Федерации
Ульяновский государственный технический университет

СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Методические указания к лабораторным работам

Составители: К.К. Васильев
С.В. Елягин

Ульяновск 2001

УДК 621.391 (076)
ББК32.815я7 С 40

Рецензент канд. техн. наук, доцент кафедры САПР Горохин В.Н.

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета университета

С 40 Система фазовой автоподстройки частоты: Методические указания к лабораторным работам/ Сост.: К.К. Васильев, С.В. Елягин. - Ульяновск: УлГТУ, 2001. - 15 с.

Методические указания разработаны в соответствии с программой курса «Теория автоматического управления» и предназначены для студентов радиотехнического факультета, но могут использоваться и студентами других факультетов.

Настоящий цикл лабораторных работ направлен на закрепление знаний по курсу «Теория автоматического управления», читаемого на направлении 55.04.00 «Телекоммуникации». Сборник подготовлен на кафедре «Телекоммуникации».

УДК 621.391(076)
ББК32.815я7

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ	4
ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ ФАПЧ	4
Фазовый дискриминатор	4
Управляемый генератор	6
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ФАПЧ.....	7
1. Лабораторная работа №1	
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ	10
2. Лабораторная работа №2	
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ С ОДНИМ ИНТЕГРАТОРОМ	12
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	15

СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) предназначены для слежения за фазой входного сигнала. Область применения систем ФАПЧ достаточно широка. Такие системы применяются в радиопередающей и радиоприемной аппаратуре при демодуляции сигналов с однополосной, балансной или фазовой модуляцией, в системах синхронизации при передаче дискретных сообщений, в доплеровских измерительных системах. В общем случае результатом работы системы ФАПЧ является обеспечение постоянства фазового сдвига между входящим сигналом и сигналом, вырабатываемым на приемной стороне.

Функциональная схема системы ФАПЧ приведена на рис. 1. Принцип работы системы заключается в следующем. Входной сигнал $u_{ex}(t)$ и сигнал с управляемого генератора $u_z(t)$ поступают на фазовый дискриминатор. Выходным сигналом фазового дискриминатора является напряжение ошибки $u_d(t)$, величина которого пропорциональна фазовому сдвигу $A\phi$ между входным сигналом и напряжением управляемого гетеродина. Сигнал ошибки усиливается и поступает на вход управляемого генератора УГ. При этом частота генерируемого колебания $u_z(t)$ изменяется в соответствии с величиной управляющего напряжения $u(t)$.



Рис.1. Функциональная схема ФАПЧ

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ ФАПЧ

Фазовый дискриминатор

Предназначен для преобразования величины фазового сдвига $A(p(t))$ между двумя сигналами $u_{ex}(t)$ и $u_z(t)$ в напряжение $u_d(t)$.

На рис.2 представлен один из вариантов фазового дискриминатора (ФД). Поскольку детекторы квадратичные, то выходное напряжение

$$u_d(t) = [u_z(t) + u_{ex}(t)]^2 - [u_z(t) - u_{ex}(t)]^2 = 4u_z(t)u_{ex}(t), \quad (1)$$

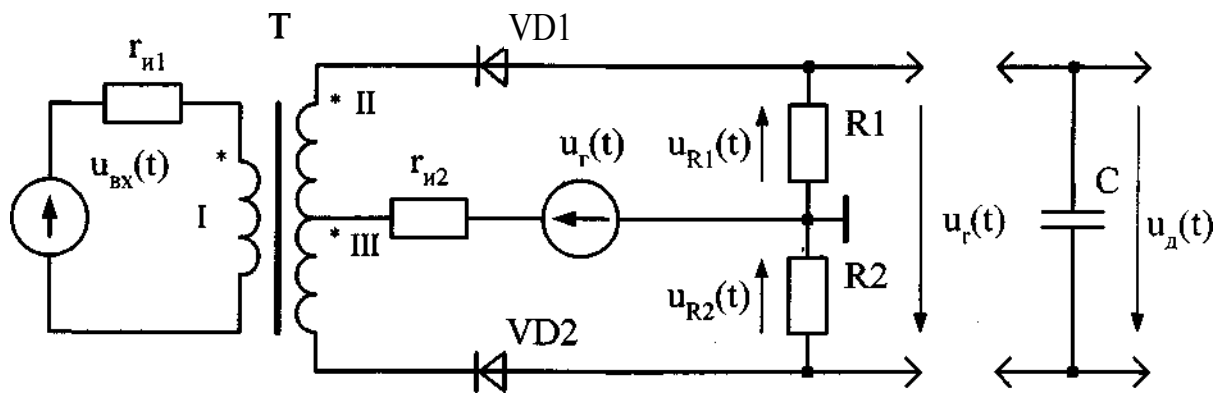


Рис. 2. Принципиальная схема фазового дискриминатора

$$u_c(t) = U_1 \sin[\omega t + \varphi_c(t)] \cdot \text{где } \varphi_c(t) \text{ - входной сигнал с изменяющейся фазой;}$$

$$u_z(t) = U_2 \cos[\omega t + \varphi_z(t)] \cdot \text{фазой;}$$

$$u_r(t) = u_{R1}(t) - u_{R2}(t) \cdot \text{i- опорный сигнал (сигнал с гетеродина);}$$

$$\text{выходное напряжение ФД.}$$

Рассмотрим работу ФД.

На основании формулы (1) фазовый дискриминатор можно рассматривать как перемножитель сигналов $u_c(t)$ и $u_z(t)$. Поэтому выходное напряжение

$$u_r(t) = 4U_1 \sin(\omega t + \varphi_c(t)) \cdot U_2 \cos(\omega t + \varphi_z(t)) =$$

$$= 2U_1 U_2 [\sin(2\omega t + \varphi_c(t) + \varphi_z(t)) + \sin(\varphi_c(t) - \varphi_z(t))]. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что выходное напряжение фазового дискриминатора содержит медленно изменяющуюся составляющую $\sin(A\varphi)$, пропорциональную величине фазового $\Delta\varphi(t) = \varphi_c(t) - \varphi_z(t)$ сдвига напряжениями $u_c(t)$ и $u_z(t)$. После выделения ее частоты (ФНЧ) достигается соответствие между постоянной составляющей u_d выходного напряжения ФНЧ и величиной фазового сдвига $A < \pi$. На рис.3 показана данная зависимость. Участок от $-\pi/2$ до $\pi/2$ радиан описывается следующим выражением:

$$u_d(t) = \kappa_d \cdot \sin \Delta\varphi(t), \quad (3) \text{ где } \kappa_d [B/pad] = 2U_1 U_2 \text{ - коэффициент передачи фазового дискриминатора.}$$

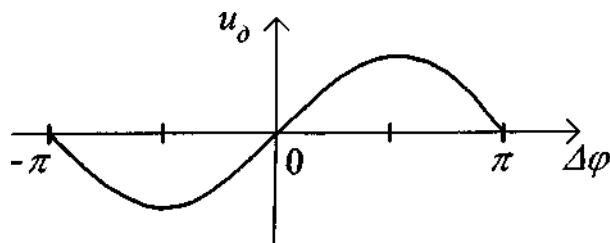


Рис. 3. Дискриминационная характеристика

Обычно система ФАПЧ функционирует при малых рассогласованиях $Aq \gg \lambda$. При этом условии $u_{\partial} \approx k_d A(p, n)$ обеспечивается линейность дискриминационной характеристики.

ФНЧ реализуется путем подключения к анодам диодов (рис.1) дополнительного конденсатора с емкостью C . При этом фазовый дискриминатор рассматривается как апериодическое звено с передаточной функцией

где T_{∂} - постоянная времени фазового (4) $H_{\partial}(p) = \frac{\kappa_{\partial}}{1 + pT_{\partial}}$,
дискриминатора.

Управляемый генератор

Предназначен для формирования гармонического сигнала, частота которого зависит от величины напряжения, приложенного к управляющему входу генератора. Для обеспечения этой зависимости в схему генератора включается варикап - полупроводниковый элемент, емкость которого зависит от значения напряжения на его выводах. Типовая вольт-фарадная характеристика варикапа приведена на рис.5, на котором обозначена начальная емкость варикапа $C_{\text{н}}$, определяемая напряжением $U_{\text{н}}$.

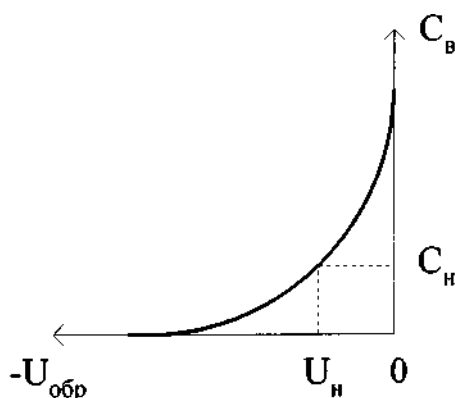


Рис. 4. Вольт-фарадная характеристика варикапа

Вариант построения управляемого генератора приведен рис.5. При небольших изменениях управляющего напряжения зависимость частоты от напряжения можно приближенно считать линейной:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_2 &= \omega_0 + \Delta\omega_2, \\ \Delta\omega_2 &= k_2 \cdot \Delta U.\end{aligned}\quad (6)$$

Поскольку управляемый генератор работает в составе системы ФАПЧ, то выходным сигналом следует считать не частоту, а фазу сигнала гетеродина:

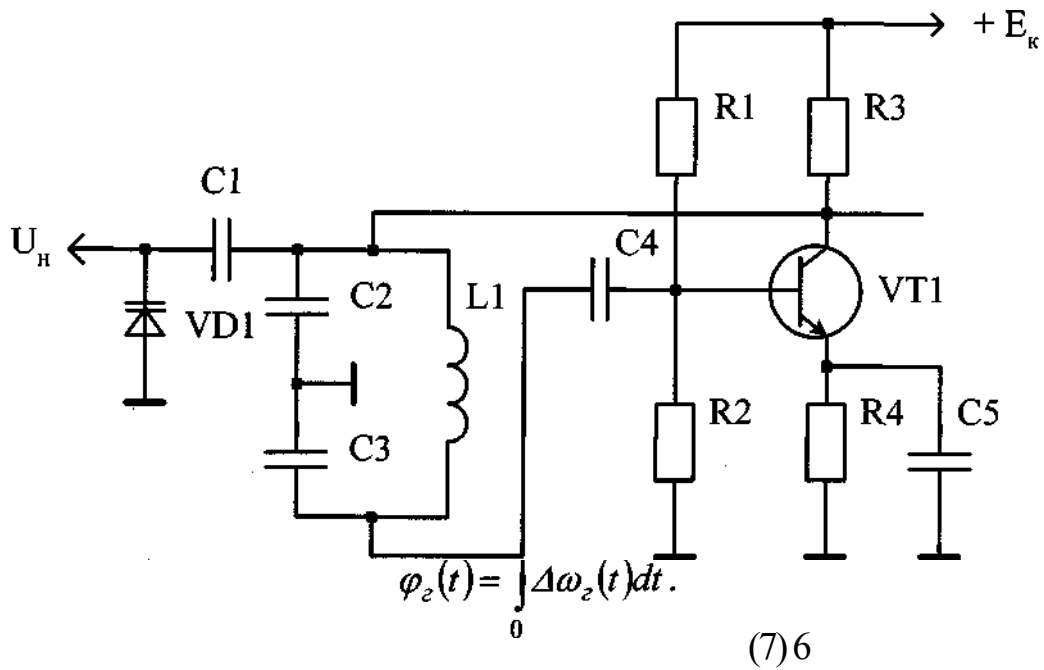


Рис. 5. Управляемый генератор

Таким образом, передаточная функция управляемого гетеродина, описывающая связь между изображением по Лапласу фазы выходного сигнала и входного напряжения, имеет вид:

(о)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Зная передаточные функции звеньев, образующих систему ФАПЧ, можно получить основные характеристики системы, такие как передаточная функция разомкнутой системы, передаточная функция замкнутой системы, передаточная функция для ошибки. Анализ этих функций позволяет сделать выводы об устойчивости замкнутой системы, о характере переходного процесса автоподстройки, о величине их динамических и случайных ошибок.

На основании функциональной схемы системы ФАПЧ (рис.1) и формул (1) -г (7) на рис.6 приведена эквивалентная сема системы ФАПЧ.

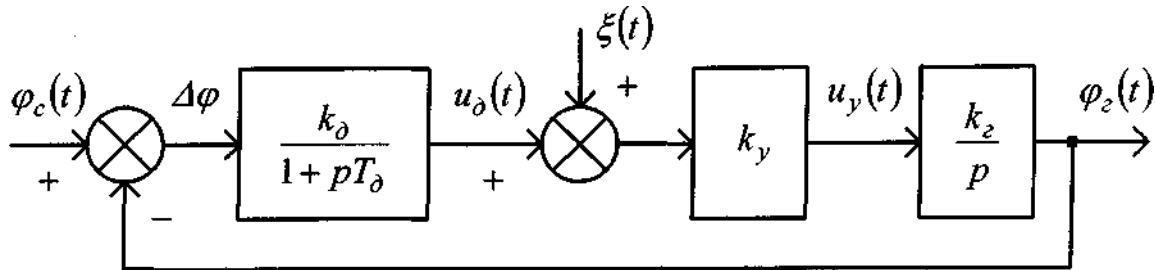


Рис. 6. Эквивалентная схема системы ФАПЧ

Передаточная функция разомкнутой системы

(9)

где $k = k_δ k_γ k_2, k_γ$ • коэффициент усиления усилителя.

Передаточная функция замкнутой системы

$$H(p) = \frac{k_δ}{1 + pT_δ} k_γ \frac{k_2}{p} = \frac{k}{p(1 + pT_δ)}, \tag{10}$$

функция $W(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{k}{p(1 + pT_δ) + k}$ Передаточная ошибки по задающему воздействию

воздействию

$$(II) \quad H_{\varepsilon}(p) = \frac{1}{1+H(p)} = \frac{p(1+pT_{\delta})}{p(1+pT_{\delta})+k}.$$

Установившееся значение ошибки

$$\varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p H_{\varepsilon}(p) g_c(p), \quad (12)$$

где $g_c(p)$ - изображение по Лапласу от задающего воздействия $q_c(t)$.

Анализ точности системы ФАПЧ

Проведем исследование динамической ошибки в зависимости от вида входного воздействия.

При ступенчатом входном воздействии, т.е. скачке фазы входного сигнала на величину $A < p$,

$$\varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{p(1+pT_{\delta})}{p(1+pT_{\delta})+k} \frac{\Delta\varphi_c}{p} = 0. \quad (13)$$

Предположим, что входной сигнал является линейной функцией от времени. Тогда отличие фазы входного сигнала $(\varphi_c(t) = A\omega_c t)$ и сигнала гетеродина

$$\varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{p(1+pT_{\delta})}{p(1+pT_{\delta})+k} \frac{\Delta\omega_c}{p^2} = \frac{\Delta\omega_c}{k}. \quad (14)$$

Заметим, что ошибка по частоте при этом будет равна нулю, т.е. частота гетеродина будет равна частоте входного сигнала.

При линейном изменении частоты входного сигнала, т.е. квадратичном изменении его фазы, рассматриваемая система неработоспособна.

Таким образом, при скачкообразном изменении фазы при условии совпадения частоты входного сигнала с собственной частотой гетеродина возможно нулевое установившееся значение ошибки.

В любой системе автоматического управления присутствуют как динамические ошибки, так и ошибки, вызванные наличием помех. Поэтому для определения качества системы используют средний квадрат суммарной ошибки:

$$\varepsilon_c^2 = M \{ [\varphi_c(t) - \varphi_z(t) + \xi(t)]^2 \} = \varepsilon^2 + \sigma_n^2, \quad (15) 8$$

где $M\{ \}$ - операция вычисления математического ожидания; s^2 - квадрат установившейся ошибки (за счет детерминированного входного воздействия (формулы (12) - (14))); σ_n^2 - дисперсия выходного сигнала системы управления за счет действия помехи.

Для нахождения σ_n^2 предположим, что входной сигнал системы ФАПЧ кроме полезной составляющей $u_c(t) = U_c \sin[\omega_c t + \varphi_c(t)]$ содержит помеху $n(t)$. Обычно такая помеха занимает широкую полосу частот и может быть представлена в виде белого шума [1-4] со спектральной плотностью мощности N_0 . В фазовом дискриминаторе помеха $n(t)$ перемножается на сигнал гетеродина и преобразуется в белый шум $\varphi(t)$ (рис.6), имеющий спектральную плотность мощности $N_\varphi = 0.5\omega_c N_0$ [5]. Спектральная плотность мощности случайной составляющей процесса $\varphi(t)$ на выходе системы находится по формуле Г1-41:

$$S_\varphi(\omega) = |W_\xi(p)|^2 N_\xi, \quad (16)$$

$$W_\xi(p) = \frac{k_y k_z}{p(1 + H(p))}$$

где N_ξ - дисперсия помехи. Для определения дисперсии ошибки σ_n^2 находим корреляционную функцию выходного случайного процесса

$$R_\varphi(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\varphi(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (17)$$

и полагаем $m = 0$. При этом

$$\sigma_n^2 = R_\varphi(0) = \frac{N_\xi k}{k_d^2} \quad (18)$$

или, после подстановки $N_\xi = 0.5U_2^2 N_0$, $k_d = 2U_1 U_2$, получим

$$\sigma_n^2 = \frac{k}{q}, \quad (19)$$

где $q = 4U_1^2 U_2^2 N_0 / k$ - отношение уровня выходного сигнала к уровню помехи на входе системы ФАПЧ.

Таким образом, дисперсия случайной составляющей ошибки пропорциональна коэффициенту усиления k системы ФАПЧ и обратно пропорциональна отношению уровней сигнала и помехи на входе системы. Обратим внимание, что при линейном входном воздействии величина устано-

вившейся динамической ошибки уменьшается при росте усиления k (формула (14)). Поэтому зависимость среднего квадрата суммарной ошибки

$$\varepsilon_c^2 = \varepsilon^2 + \sigma_n^2 = \frac{\Delta\omega_c^2}{k^2} + \frac{k}{q} \quad (20)$$

имеет минимум при определенном значении коэффициента передачи k системы. Выбор значения коэффициента k , обеспечивающего этот минимум, называется параметрической оптимизацией системы ФАПЧ.

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Цель работы - изучить функциональную и принципиальную схемы системы ФАПЧ, уяснить принцип работы каждого узла, провести экспериментальные исследования работы системы в целом и отдельных ее узлов.

Задание к лабораторной работе

1. Изучить функциональную схему системы ФАПЧ (рис. 1.1). Подать напряжение питания на макет системы ФАПЧ.

2. Разомкнуть петлю ФАПЧ:

- ключ S_1 в положении 2;
- ключ S_2 в положении 1;
- переменный конденсатор C_n в среднем положении.

С помощью переменного резистора R_u добиться примерного совпадения частот гетеродина f_r и входного сигнала f_c .

Снять и построить дискриминационную характеристику фазового дискриминатора для случая отклонения фазы входного сигнала φ_c от фазы гетеродина φ_r

$$u_d = F1(\Delta\varphi). \quad (1.1)$$

Частота входного сигнала изменяется посредством изменения емкости переменного конденсатора C_n . В качестве напряжения фазового дискриминатора принять напряжение на выходе усилителя.

3. Построить зависимость частоты гетеродина f_r от управляющего напряжения U_H на входе гетеродина

$$f_r = F2(U_H). \quad (1.2)$$

В качестве напряжения на входе гетеродина принять напряжение U_1 . Напряжение U_1 изменяется с помощью переменного

резистора

R_u

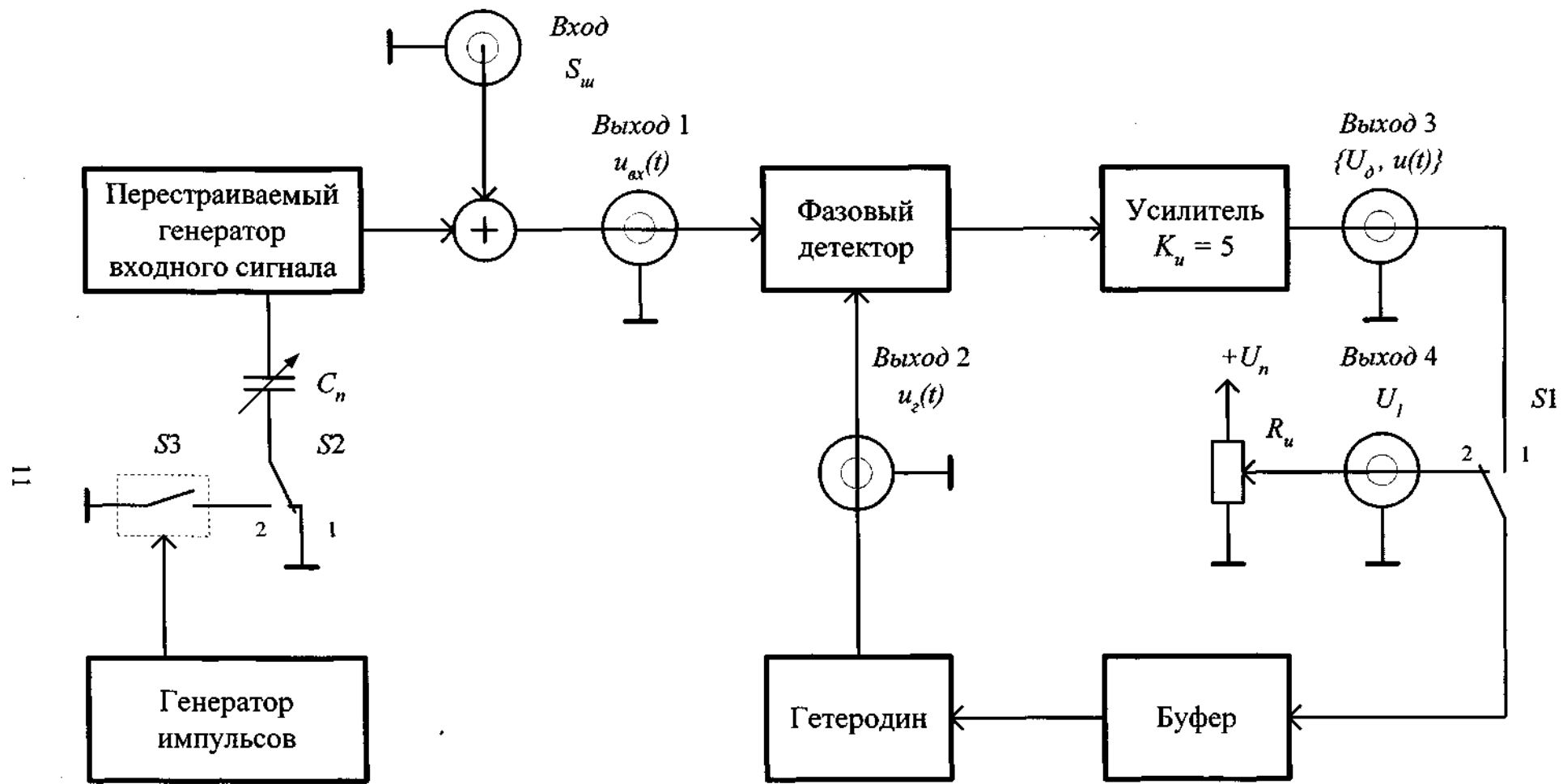


Рис.1.1. Функциональная схема системы фазовой автоподстройки частоты

4. Замкнуть петлю ФАПЧ. Для этого ключ $S1$ установить в положение 1.

Получить на экране осциллографа фигуры Лиссажу. Изменяя частоту входного сигнала f_c , проследить за изменением осциллограммы. Объяснить полученные результаты.

Перевести осциллограф в режим внутренней синхронизации. Определить полосу захвата и полосу удержания.

5. Исследовать процесс автоподстройки при скачкообразном изменении частоты входного сигнала f_c . Для этого ключ $S2$ следует поставить в положение 2. Получить на экране осциллографа фигуры Лиссажу. С помощью конденсатора C_n добиться захвата частоты.

Снять и построить напряжение переходного процесса $u_n(t)$, по которому определить характер переходного процесса и время установления t .

Напряжение переходного процесса снимать с выхода усилителя. По окончании изучения переходного процесса ключ $S2$ перевести в положение 1. Объяснить полученные результаты.

Контрольные вопросы

- 1.1. Назовите области применения системы ФАПЧ.
- 1.2. Из каких звеньев состоит система ФАПЧ? Объясните их назначение и принцип действия.
- 1.3. Напишите формулу для передаточной функции разомкнутой системы ФАПЧ и поясните ее вид.
- 1.4. Чем определяется вид и длительность переходного процесса в системе ФАПЧ?
- 1.5. Укажите связь между типовыми и реальными входными воздействиями на систему ФАПЧ.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ С ОДНИМ ИНТЕГРАТОРОМ

Цель работы - изучить работу системы ФАПЧ с одним интегратором, исследовать работу системы при наличии помехи в воздействующем сигнале.

Задание к лабораторной работе

1. Изучить функциональную схему системы ФАПЧ (рис.2.1). Подать напряжение питания на макет ФАПЧ.

2. Исключить из схемы интегратор, установив ключ $S1$ в положение 1. Убедиться в работоспособности системы ФАПЧ.

Изменяя частоту f_{ex} входного сигнала $u_{ex}(t)$, качественно построить зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi$ между двумя сигналами $u_{ex}(t)$ и $u_z(t)$ от частоты f_{ex} входного сигнала

$$\Delta\varphi = F(f_{ex}). \quad (2.1)$$

3. Ввести в схему интегратор:

- ключ $S1$ в положении 2;
- ключ $S2$ разомкнут.

Изменяя емкость конденсатора C_n проследить за работой системы ФАПЧ. Объяснить полученный результат.

4. Ввести в схему форсирующее звено, замкнув ключ $S2$. Качественно построить зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi$ между двумя сигналами $u_{ex}(t)$ и $u_z(t)$ от частоты f_{ex} входного сигнала.

5. Изучить влияние шума на точность работы системы ФАПЧ при наличии интегратора и при его отсутствии. Для этого подключить генератор шума ко входу $\delta_{ш}$. Зарисовать осциллограммы сигналов при различном уровне шума. Отключить развертку в осциллографе и подключить его вход к выходу усилителя. Измерить дисперсию ошибки при различных коэффициентах усиления. Объяснить полученные результаты.

Контрольные вопросы

2.1. Какими функциями и параметрами описывается система автоматического управления (САУ)?

2.2. Назовите и поясните виды ошибок в САУ.

2.3. Обоснуйте необходимость в системе ФАПЧ дополнительного интегратора. Какие преимущества у такой системы ФАПЧ?

2.4. Какими функциями описываются типовые входные воздействия системы автоуправления?

2.5. Как влияет помеха на точность работы системы?

2.6. В чем заключается оптимизация параметров САУ?

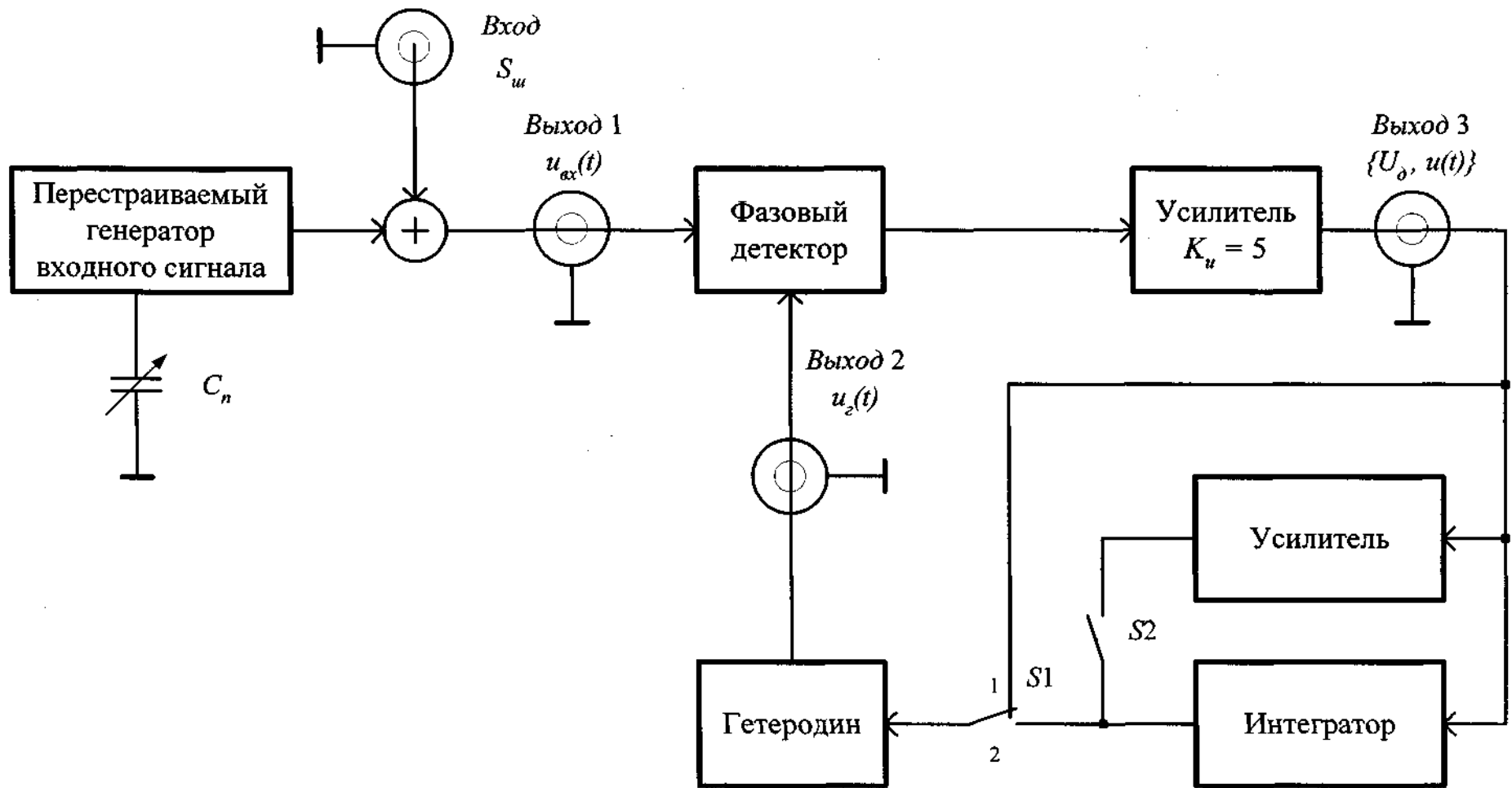


Рис.2.1. Функциональная схема системы фазовой автоподстройки частоты с дополнительным интегратором

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоавтоматика/ В.А.Бесекерский, А.А.Елисеев, А.В.Небылов и др.; Под ред. В.А.Бесекерского. -М.: Высшая шк., 1985. -271 с.
2. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. -М.: Высшая шк., 1985. -335 с.
3. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Фазовая автоподстройка частоты. - М.: Связь, 1966.-334 с.
4. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следящие системы): Учебное пособие. -Ульяновск, 1999. -96 с.
5. Первачев С.В., Валуев А.А., Чиликин В.М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. -М.: Сов. радио, 1973. - 488 с.

Учебное издание

СИСТЕМА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Методические указания к лабораторным работам

Составители: **Васильев** Константин Константинович
Елягин Сергей Владимирович

Корректор А. Трофимова

Подписано в печать 31.08.2001. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,90. Тираж 50 экз. Заказ 483\$

Ульяновский государственный технический университет,
432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Типография УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.