

Кафедра приборостроения, метрологии и сертификации

Л.А. Бондарева

УПРАВЛЕНИЕ В БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания
по выполнению расчетно-графической работы

Дисциплина – «Управление в биотехнических системах»
Направление – 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

Орёл
ОГУ имени И.С. Тургенева
2020

Автор: канд. техн. наук, доц. каф. ПМиС Л.А. Бондарева

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. ПМиС М.В. Яковенко

Методические указания содержат варианты заданий, теоретическую часть и методику динамического анализа устройств систем автоматического управления.

Предназначены студентам, обучающимся по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» очной формы обучения, изучающим дисциплину «Управление в биотехнических системах».

Могут быть полезны студентам других технических специальностей, изучающих основы теории автоматического управления.

Редактор В.Ю. Крутикова
Технический редактор Н.Н. Лысых

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Подписано к печати 08.07.2020 г. Формат 60×90 1/16.

Усл. печ. л. 3,3. Тираж 10 экз.

Заказ № ____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| 1 Общие указания | 5 |
| 1.1 Назначение и структура расчетно-графических работ | 5 |
| 1.2 Подготовка к выполнению и защите расчетно-графической работы | 6 |
| 1.3 Оформление расчетно-графической работы | 6 |
| 2 Описание расчетно-графических работ | 7 |
| 2.1 Расчетно-графическая работа №1 Исследование динамических характеристик системы | 7 |
| 2.1.1 Цель работы | 7 |
| 2.1.2 Теоретическая часть расчетно-графической работы | 7 |
| 2.1.3 Подготовка к работе | 22 |
| 2.1.4 Контрольные вопросы | 23 |
| 2.1.5 Исходные данные и задание для расчетно-графической работы | 24 |
| 2.1.6 Порядок расчета | 25 |
| 2.1.7 Содержание отчета по расчетно-графической работе | 31 |
| 2.2 Расчетно-графическая работа №2 Исследование устойчивости системы | 32 |
| 2.2.1 Цель работы | 32 |
| 2.2.2 Теоретическая часть расчетно-графической работы | 32 |
| 2.2.3 Подготовка к работе | 36 |
| 2.2.4 Контрольные вопросы | 36 |
| 2.2.5 Исходные данные и задание для расчетно-графической работы | 37 |
| 2.2.6 Порядок расчета | 38 |
| 2.2.7 Содержание отчета по расчетно-графической работе | 39 |
| Литература | 40 |
| Приложение А | 41 |
| Приложение Б | 42 |
| Приложение В | 43 |
| Приложение Г | 52 |

ВВЕДЕНИЕ

Заключительным этапом изучения дисциплины «Управление в биологических и медицинских системах» является выполнение расчетно-графических работ (РГР). РГР нацелены на углубление и расширение знаний студентов по основополагающим положениям разделов учебной дисциплины. Целью проведения РГР является систематизация и расширение теоретических знаний, приобретение практических навыков и умений в области теории управления.

Управление каким-либо объектом – это процесс воздействия на него с целью обеспечения сохранения определенной структуры, требуемого течения процессов в объекте или требуемого изменения его состояния и реализации заданных программ и целей. Теория управления базируется на получении и обработке информации о состоянии объекта и внешних условиях его работы, которая используется для выработки воздействия, прикладываемого к объекту и обеспечивающего достижение цели управления. Причем, являясь динамическим процессом, целенаправленное управление может осуществляться только при знании основных характеристик всех компонентов системы управления, независимо от их природы.

В современной биологии и медицине широко используются различные приборы, аппараты и комплексы, предоставляющие исследователю полную информацию о состоянии биологического объекта в момент исследования с целью обеспечения возможности дальнейшего управления им, а также способствующие нормализации состояния биообъекта и позволяющие замещать физиологические функции организма в условиях патологии и при экстремальных ситуациях. Улучшение качества управления в биологических и медицинских системах, в первую очередь, связано с автоматизацией процессов управления, когда, либо часть функций, либо полностью, они передаются от человека автоматическим устройствам.

Сложность протекания процессов управления в медицинских системах и необходимость повышения их производительности и точности, связанные с широким применением автоматизированных и автоматических систем управления, требуют в процессе анализа и синтеза систем получения точного математического описания, причем как отдельных элементов, так и всей системы в целом, проведения оценки устойчивости систем и прогнозирования их работы в статическом и динамическом режимах.

1 ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1 Назначение и структура расчетно-графических работ

Расчетно-графические работы (РГР), включенные в методические указания, направлены на углубление знаний студентов в области теории управления и приобретение ими практических навыков проведения динамических расчетов элементов систем управления.

Выполнение РГР должно закрепить знания, полученные студентами на лекциях, привить навыки проведения теоретических исследований и анализа динамических свойств систем управления и их отдельных элементов, а также научить студентов применять возможности программы математического проектирования MathCAD для получения динамических характеристик систем.

Обязательный расчетно-графический практикум по дисциплине “Управление в биологических и медицинских системах” рассчитан на две работы, которые являются взаимосвязанными и базируются на одних и тех же исходных данных. Первая работа включает анализ динамических характеристик отдельных элементов системы, основным компонентом которых является операционный усилитель, и получение общей передаточной функции системы и анализ ее динамики. Во второй работе осуществляется проведение анализа устойчивости системы по различным критериям (алгебраическому критерию Гурвица, частотному критерию Михайлова и амлитудно-фазовому критерию Найквиста).

1.2 Подготовка к выполнению и защите расчетно-графической работы

Подготовка к выполнению расчетно-графической работы заключается в изучении студентами теории по теме работы. Кроме того, при подготовке студент также должен использовать конспект лекций.

Варианты заданий и методика выполнения РГР изложена в данном методическом указании.

В каждой работе приводится теоретическая часть и сформулированы контрольные вопросы, которые позволят студенту подготовиться к защите расчетно-графической работы. Подготовку к защите работы студент выполняет самостоятельно во внеаудиторное время. Консультации по подготовке к работе проводятся преподавателем согласно расписанию.

К защите РГР допускается студент, выполнивший все расчеты, оформивший их результаты в соответствии с ГОСТ 2.105-95 [1] и получивший допуск к защите у преподавателя.

1.3 Оформление расчетно-графической работы

Оформление результатов РГР выполняется каждым студентом самостоятельно на листах стандартного формата (210x297) в соответствии с алгоритмом, предложенном в данных методических указаниях. Титульный лист оформляется в соответствии с приложением А.

По каждой РГР обязательно должны быть сделаны выводы, которые излагаются кратко, но должны содержать все необходимые сведения и быть подтверждены данными, полученными в процессе проведения расчетов.

Схемы, графики и таблицы необходимо выполнять в соответствии с требованиями ЕСКД и ГОСТ 2.105 [1].

Расчетно-графические работы, оформленные не по стандарту, к проверке и защите не принимаются.

2 ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

2.1 Расчетно-графическая работа №1

Исследование динамических характеристик системы

2.1.1 Цель работы

Закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях по разделу: “Математическое описание систем автоматического управления” и формирование практических навыков в теории систем автоматического управления, которые должны быть положены в основу практической деятельности по проектированию и эксплуатации различных систем медицинского назначения.

2.1.2 Теоретическая часть расчетно-графической работы

Основным элементом аналоговых устройств является операционный усилитель (ОУ), позволяющий непосредственно реализовывать линейные операции при решении систем дифференциальных уравнений и в составе функциональных блоков выполнять многие нелинейные операции [2, 3]. ОУ характеризуются большим коэффициентом усиления, высоким входным и низким выходным сопротивлением, однако свойства и параметры операционного усилителя определяются преимущественно параметрами цепи обратной связи. Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей, основанные на применении операционных усилителей, показаны на рисунке 1.

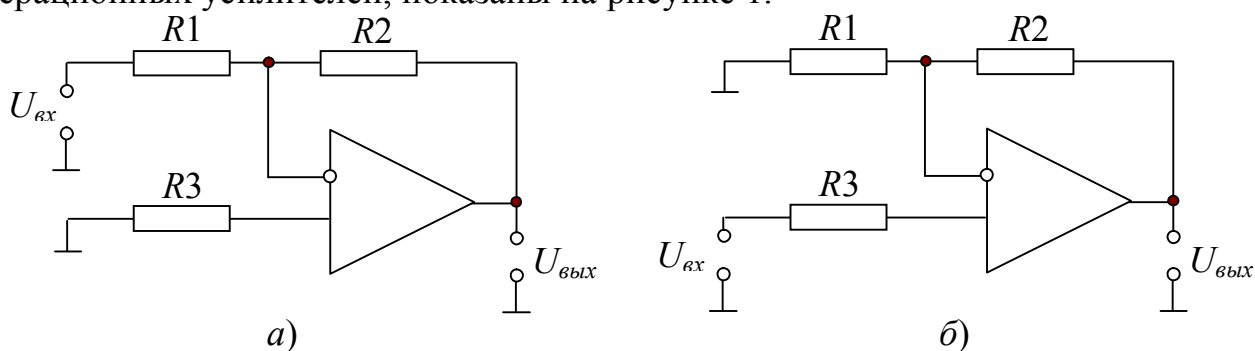


Рисунок 1 – Схемы инвертирующего (а) и неинвертирующего (б) усилителей на основе ОУ

В обеих схемах ОУ охвачен отрицательной обратной связью по напряжению, и на И-вход ОУ подается часть входного напряжения. В случае инвертирующего усилителя (рисунок 1, а) входной сигнал и сигнал отрицательной обратной связи суммируются с помощью резисторов R_1 и R_2 . В неинвертирующем усилителе (рисунок 1, б) дифференциальное входное напряжение ОУ образуется непосредственно как разность входного напряжения и напряжения обратной связи.

Коэффициенты усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей, показанных на рисунке 1, определяются следующими выражениями [2]

$$K_u = -\frac{\mu K}{K\beta + 1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + 1/(K\beta)}, \quad (1)$$

$$K_n = -\frac{K}{K\beta + 1} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \cdot \frac{1}{1 + 1/(K\beta)}, \quad (2)$$

где $\mu = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ – коэффициент усиления входного напряжения, проходящего на И-вход в инвертирующем усилителе;

$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ – коэффициент обратной связи;

K – коэффициент усиления ОУ без обратной связи.

Если $K\beta \gg 1$, то

$$K_u = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (3)$$

$$K_n = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right). \quad (4)$$

Отношение сопротивлений входной цепи и цепи обратной связи определяют соотношения между входным и выходным напряжением операционного усилителя и, следовательно, характер выполняемых им операций. Поэтому для идеального операционного усилителя, динамические свойства которого полностью описываются коэффициентом преобразования (усиления), верным будет

представление передаточной функции инвертирующего и неинвертирующего усилителя в следующем виде

$$W_u(p) = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (5)$$

$$W_n(p) = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right), \quad (6)$$

где p – оператор Лапласа.

Однако реальный ОУ обладает инерционными свойствами, и в полосе частот от нескольких килогерц или единиц мегагерц ОУ по своим динамическим свойствам близок к инерционному звену первого порядка, поэтому его передаточная функция изменится и будет учитывать проявление инерционных свойств усилителя

$$W(p) = \frac{K}{1 + p\tau_{oy}}, \quad (7)$$

где τ_{oy} – постоянная времени ОУ.

С ростом частоты сигнала модуль коэффициента усиления ОУ снижается со скоростью, примерно равной 20 дБ на декаду. Это снижение означает, что при увеличении частоты в 10 раз во столько же раз уменьшается и модуль коэффициента усиления. Если бы такая скорость сохранялась во всем диапазоне частот, то постоянная времени ОУ могла бы быть найдена как

$$\tau_{oy} = \frac{K}{2\pi f_1}, \quad (8)$$

где f_1 – частота единичного усиления ОУ.

Однако в большинстве случаев в области частот $f \approx f_1$ ОУ ведет себя как динамическое звено второго или третьего порядка. Поэтому значение τ_{oy} , определенное по вышеуказанной формуле, может оказаться несколько завышенным.

Тем не менее, соотношение (7) справедливо в достаточно широкой области частот, которая, как правило, перекрывает диапазоны частот полезных сигналов, с которыми приходится иметь дело при применении операционных уси-

лителей. Это означает, что было бы правильным в приведенных ранее равенствах (1) и (2) вместо коэффициента усиления K использовать коэффициент $K(p)$, определенный формулой (7). Соответственно для инвертирующего и неинвертирующего усилителей получим [2]

$$W_u(p) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{K\beta}{K\beta + 1} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{oy}/(K\beta + 1)}, \quad (9)$$

$$W_n(p) = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \cdot \frac{K\beta}{K\beta + 1} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{oy}/(K\beta + 1)}. \quad (10)$$

Полученные формулы иллюстрируют известное положение о том, что при охвате инерционного звена отрицательной обратной связью его эквивалентная постоянная времени уменьшается в $(K\beta + 1)$ раз, где $K\beta$ – петлевое усиление.

Отсюда следует, что при прочих равных условиях быстродействие инвертирующего и неинвертирующего усилителя будет тем выше, чем больше коэффициент отрицательной обратной связи. Это действительно верно, но лишь для ОУ с внутренней частотной коррекцией, которая осуществляется с помощью подключения конденсаторов и резисторов к соответствующим зажимам ОУ.

Назначение частотной коррекции – предотвращать автоколебания выходного сигнала при охвате усилителя цепью отрицательной обратной связи. Причина автоколебаний – нежелательные фазовые сдвиги в усилителе и цепи обратной связи, вследствие чего отрицательная обратная связь на некоторой частоте приобретает свойства положительной обратной связи. При этом, чем сложнее усилитель и чем выше его коэффициент усиления, тем более он склонен к самовозбуждению.

Рекомендуемые для различных конкретных ОУ цепи коррекции обычно рассчитываются еще на стадии проектирования ОУ, и затем параметры этих цепей приводятся в руководстве по применению ОУ. Ряд ОУ имеет встроенные цепи частотной коррекции, реализованные, как правило, на основе МОП-конденсаторов, формируемых в кристалле одновременно с другими элементами

усилителя. К таким усилителям, в частности, относятся ОУ типов К140УД6, К140УД7, К140УД8, К544УД1.

Наличие внутренней частотной коррекции является существенным достоинством при эксплуатации усилителя, хотя и не позволяет в полной мере использовать динамические свойства усилителя при малых значениях коэффициента отрицательной обратной связи, так как внутренняя коррекция рассчитана на введение глубокой отрицательной обратной связи, вплоть до $\beta_0 = 1$.

Если же используется внешняя корректирующая цепь, то обычно ее параметры изменяются при изменении $K\beta$. С ростом $K\beta$ приходится увеличивать корректирующие емкости, так что отношение $\tau_{oy}/(K\beta + 1)$ может оставаться примерно постоянным. Кроме этого следует помнить, что полученные зависимости справедливы только для работы усилителей в линейном режиме.

Наряду с представленными на рисунке 1 схемами находят применение их различные модификации, в частности, схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей, в цепь обратной связи которых входит Т-образный трехполюсник, составленный из резисторов $R2$, $R3$, $R4$ (рисунок 2 [2]), что позволяет уменьшить диапазон сопротивлений, необходимых для получения заданных коэффициентов усиления.

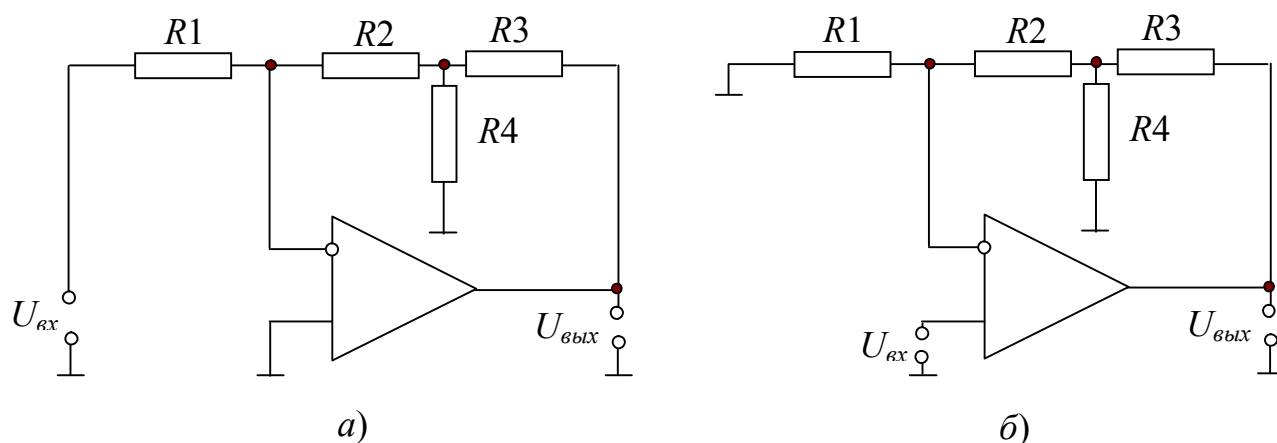


Рисунок 2 – Схемы усилителей с Т-образной цепью обратной связи

В данном случае для схем справедливы соотношения

$$K_u = -\frac{R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_4}{R_1}, \quad (11)$$

$$K_n = \frac{R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_4}{R_1} + \frac{R_3}{R_4} + 1. \quad (12)$$

Для построения неинвертирующего усилителя переменного напряжения применяют схему, показанную на рисунке 3 [2], ее достоинство – возможность получения высокого входного сопротивления.

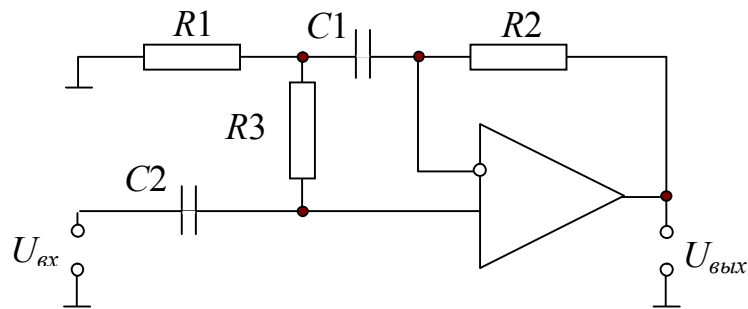


Рисунок 3 – Схема усилителя переменного напряжения

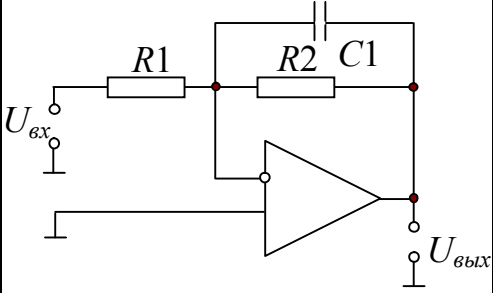
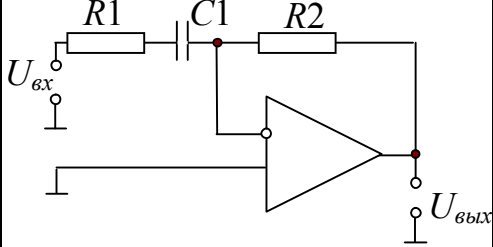
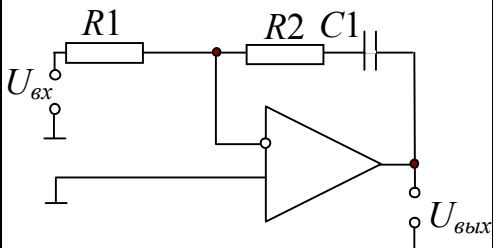
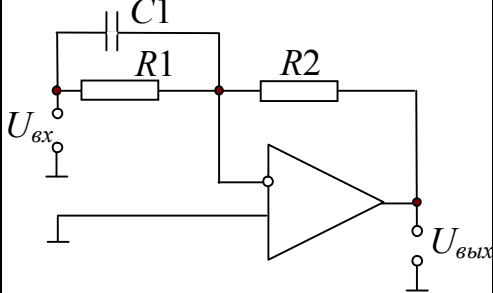
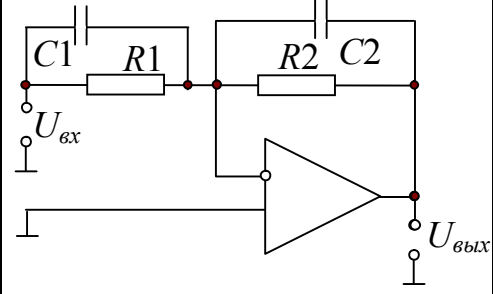
Если найти в операторном виде коэффициент усиления этого усилителя, то получим

$$\frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{1 + R_2/R_1 + 1/(pC_1R_1) + 1/(pC_1R_3)}{1 + 1/(pC_1R_1) + 1/(pC_1R_3) + 1/(p^2C_1R_1C_2R_3)}. \quad (13)$$

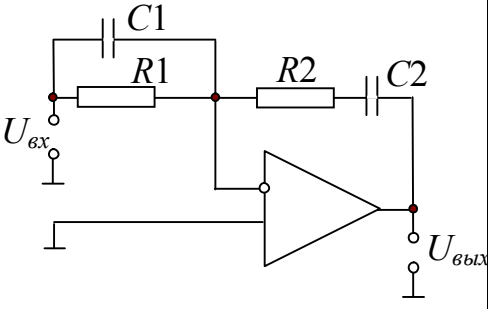
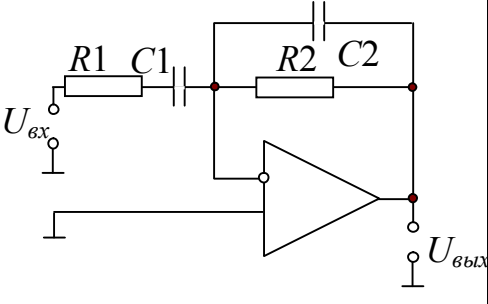
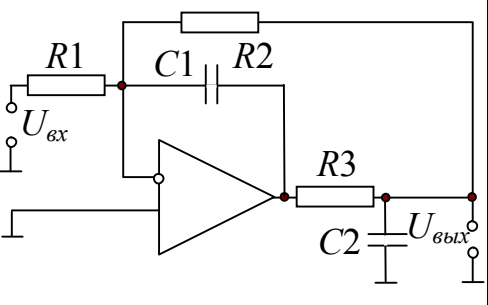
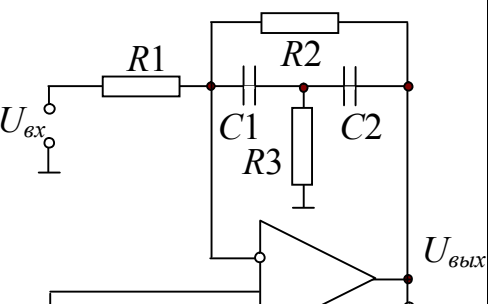
Следует отметить, что, выбирая соответствующим образом импедансы входной цепи ОУ и цепи обратной связи, можно воспроизвести на операционном усилителе типовые динамические звенья и их комбинации.

Схемы реализации некоторых типовых звеньев на ОУ приведены в таблице 1 [4-7].

Таблица 1 – Схемы реализации простейших передаточных функций

| № | Схема реализации | Реализуемое дифференциальное уравнение |
|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 |  | $R_2 C_1 \frac{dU_{6blx}}{dt} + U_{6blx} = -\frac{R_2}{R_1} U_{6x},$ $\tau_1 \frac{dU_{6blx}}{dt} + U_{6blx} = -k_1 U_{6x},$ <p>где $\tau_1 = R_2 C_1$; $k_1 = \frac{R_2}{R_1}$.</p> |
| 2 |  | $R_1 C_1 \frac{dU_{6blx}}{dt} + U_{6blx} = -R_2 C_1 U_{6x},$ $\tau_1 \frac{dU_{6blx}}{dt} + U_{6blx} = -k_1 U_{6x},$ <p>где $\tau_1 = R_1 C_1$, $k_1 = R_2 C_1$.</p> |
| 3 |  | $R_1 C_1 \frac{dU_{6blx}}{dt} = -\left(R_2 C_1 \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} \right),$ $\tau_1 \frac{dU_{6blx}}{dt} = -\left(\tau_2 \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} \right),$ <p>где $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_1$.</p> |
| 4 |  | $\frac{R_1}{R_2} U_{6blx} = -R_1 C_1 \frac{dU_{6x}}{dt} - U_{6x},$ $\frac{1}{k_1} U_{6blx} = -\tau_1 \frac{dU_{6x}}{dt} - U_{6x},$ <p>где $\tau_1 = R_1 C_1$; $k_1 = \frac{R_2}{R_1}$.</p> |
| 5 |  | $R_2 C_2 \frac{dU_{6blx}}{dt} + U_{6blx} = -\frac{R_2}{R_1} \left(R_1 C_1 \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} \right),$ $\tau_2 \frac{dU_{6blx}}{dt} + U_{6blx} = -k_1 \left(\tau_1 \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} \right),$ <p>где $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$; $k_1 = \frac{R_2}{R_1}$.</p> |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| 6 |  | $R_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^2 U_{6x}}{dt^2} + (R_1 C_1 + R_2 C_2) \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} =$ $= -R_1 C_2 \frac{dU_{6b1x}}{dt},$ $\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 U_{6x}}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} = -\tau_3 \frac{dU_{6b1x}}{dt},$ <p>где $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$; $\tau_3 = R_1 C_2$.</p> |
| 7 |  | $R_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^2 U_{6b1x}}{dt^2} + (R_1 C_1 + R_2 C_2) \frac{dU_{6b1x}}{dt} + U_{6b1x} =$ $= -R_2 C_1 \frac{dU_{6x}}{dt},$ $\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 U_{6b1x}}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dU_{6b1x}}{dt} + U_{6b1x} = -\tau_3 \frac{dU_{6x}}{dt},$ <p>где $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$; $\tau_3 = R_1 C_2$.</p> |
| 8 |  | $R_2 R_3 C_1 C_2 \frac{d^2 U_{6b1x}}{dt^2} + R_2 C_1 \frac{dU_{6b1x}}{dt} + U_{6b1x} =$ $= -\frac{R_2}{R_1} U_{6x},$ $\tau_1^2 C_2 \frac{d^2 U_{6b1x}}{dt^2} + 2\xi \tau_1 \frac{dU_{6b1x}}{dt} + U_{6b1x} = -k_1 U_{6x},$ <p>где $\tau_1 = \sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}$; $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_3 C_2}}$; $k_1 = \frac{R_2}{R_1}$.</p> |
| 9 |  | $R_2 R_3 C^2 \frac{d^2 U_{6b1x}}{dt^2} + 2R_3 C \frac{dU_{6b1x}}{dt} + U_{6b1x} =$ $= -\frac{R_2}{R_1} \left(2R_3 C \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} \right),$ <p>при $C = C_1 = C_2$,</p> $\tau_2 \frac{d^2 U_{6b1x}}{dt^2} + 2\xi \tau_2 \frac{dU_{6b1x}}{dt} + U_{6b1x} =$ $= -k_1 \left(\tau_1 \frac{dU_{6x}}{dt} + U_{6x} \right),$ |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| | | <p>где $\tau_1 = 2R_3C$; $\tau_2 = R_2R_3C^2$; $\xi = \frac{1}{R_2C}$;</p> <p>$k_1 = \frac{R_2}{R_1}$.</p> |

Такие схемы целесообразно применять в тех случаях, когда требуется обеспечить решение с использованием минимального числа операционных усилителей или же когда реализуемая передаточная функция стационарна.

Широкое применение в измерительной технике находят и активные фильтры на основе ОУ, которые состоят из операционных усилителей, работающих в линейном режиме, и пассивных элементов. Передаточная функция таких цепей может быть записана в виде отношения двух операторных полиномов, а аппроксимация характеристик активных фильтров сводится к выбору таких коэффициентов этих полиномов, которые обеспечивают наилучшее приближение к желаемым амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристикам фильтра.

Рассмотрим подробно фильтры нижних частот, которые в настоящее время широко используются в измерительной технике. Наиболее широкое применение находят фильтры, представленные в таблице 2 [2, 8].

Таблица 2 – Активные фильтры на основе ОУ

| № | Название | Нормированная АЧХ | Свойства фильтра |
|---|--------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Фильтр Баттерворта | $ A(\bar{\omega}) = \frac{1}{\sqrt{\bar{\omega}^{2n} + 1}},$ <p>где $\bar{\omega} = \omega/\omega_c$ – относительная частота; n – порядок фильтра.</p> | <p>Полиномиальный фильтр, который обладает монотонно спадающей АЧХ, т.е. при увеличении частоты АЧХ никогда не возрастает.</p> <p>АЧХ является наиболее плоской около частоты $\omega = 0$, все производные функции $A(\bar{\omega})$ по частоте от первой до $(2n-1)$-й включительно в точке $\omega = 0$ равны нулю, поэтому фильтр обладает максимально плоской АЧХ в диапазоне низких частот</p> |

Продолжение таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---------------------------|---|--|
| | | | <p>и наилучшим образом аппроксимирует идеальную АЧХ.</p> <p>Однако для частот расположенных около частоты среза и в полосе задерживания он значительной уступает фильтру Чебышева.</p> |
| 2 | Фильтр Чебышева | $ A(\bar{\omega}) ^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\bar{\omega})}$ | <p>Оптимальный полиномиальный активный фильтр, АЧХ которого содержит пульсации (колебания передачи) в полосе пропускания и монотонна в полосе задерживания.</p> <p>В полосе пропускания квадрат АЧХ $A(\bar{\omega})$ колеблется между уровнями, равными 1 и $1/(1 + \varepsilon^2)$, причем число таких колебаний тем больше, чем выше порядок фильтра, и все пульсации равны по значению.</p> <p>Ширина переходной области уже, чем у фильтра Баттерворта.</p> |
| 3 | Инверсный фильтр Чебышева | $ A(\bar{\omega}) ^2 = \frac{\varepsilon^2 T_n^2(1/\bar{\omega})}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(1/\bar{\omega})}$ | <p>Неполиномиальный фильтр, у которого АЧХ монотонно изменяется в полосе пропускания и содержит пульсации в полосе задерживания.</p> <p>В полосе заграждения квадрат АЧХ $A(\bar{\omega})$ пульсирует между значениями 0 и $\varepsilon^2/(1 + \varepsilon^2)$.</p> |
| 4 | Эллиптический фильтр | | <p>Неполиномиальный фильтр, его АЧХ обладает пульсациями как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания.</p> <p>Обеспечивает наибольшую скорость спада АЧХ в переходной области.</p> |
| 5 | Фильтр Бесселя | | <p>Полиномиальный фильтр, наилучшая аппроксимация которого ищется не для АЧХ, а для ФЧХ. Обеспечивает наилучшее приближение реальной ФЧХ к идеальной линейной зависимости, соответствующей постоянному запаздыванию.</p> <p>Этот фильтр в отличие от фильтров Баттерворта и Чебышева практически не</p> |

Продолжение таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|--|
| | | | дает выбросов при подаче на его вход ступенчатых сигналов, поэтому его используют для фильтрации прямоугольных импульсов без изменения их формы. |

На рисунке 4 показаны примеры АЧХ всех представленных в таблице 2 фильтров 4-го порядка.

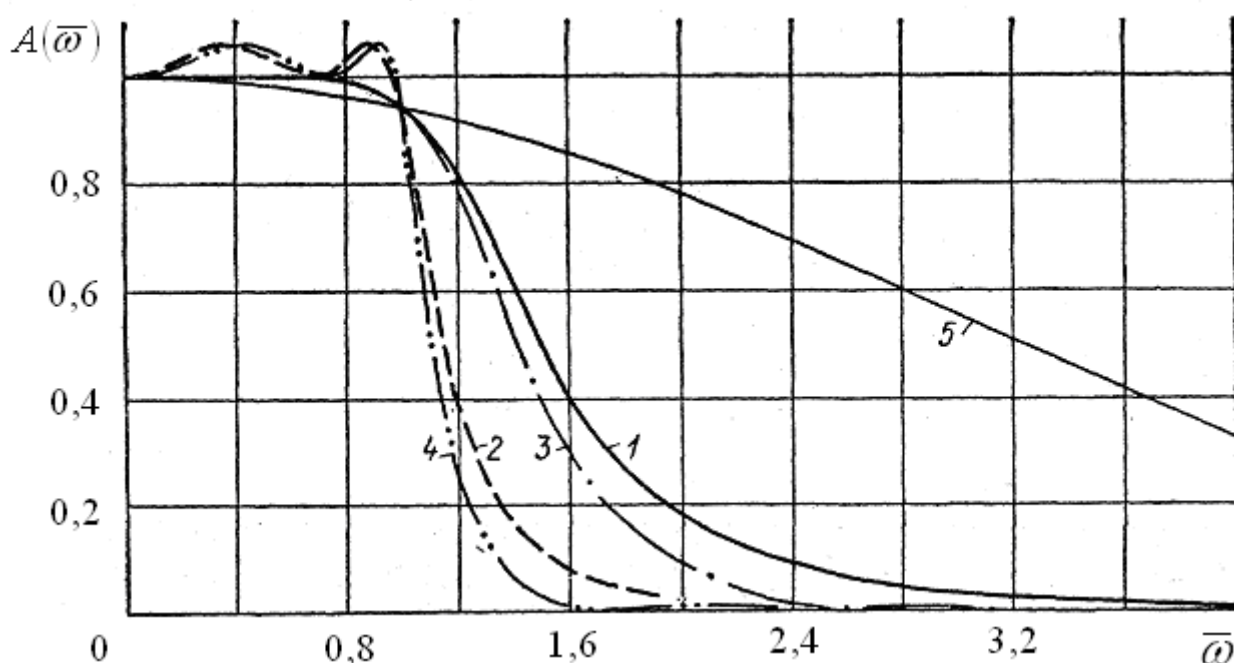


Рисунок 4 – График амплитудно-частотных характеристик активных фильтров нижних частот четвертого порядка:

1 – фильтр Баттерворта; 2 – фильтр Чебышева; 3 – инверсный фильтр Чебышева; 4 – эллиптический фильтр; 5 – фильтр Бесселя

Следует отметить, что чем выше порядок фильтров Баттерворта и Чебышева, тем лучше их АЧХ. Однако более высокий порядок существенно усложняет схемную реализацию этих фильтров и вследствие этого повышает их стоимость. Поэтому при их использовании особое внимание уделяется выбору минимально необходимого порядка фильтра, удовлетворяющего заданным требованиям.

В качестве этих требования для расчета задают максимально допустимое затухание в полосе пропускания α_1 (дБ), минимально допустимое затухание в полосе задерживания α_2 (дБ), частоту среза f_c (Гц) или $\omega_c = 2\pi f_c$ (рад/с) и максимально допустимую ширину переходной области TW , определяемую по следующей формуле

$$TW = \omega_1 - \omega_c, \quad (14)$$

где ω_1 – частота, после которой начинается полоса задерживания фильтра.

Для фильтра Баттерворта $\alpha_1 = 3$ дБ и минимальный порядок определяют, используя выражение

$$n = \frac{\log(10^{\alpha_2/10} - 1)}{2 \log(\omega_1/\omega_c)} \quad (15)$$

или

$$n = \frac{\log(10^{\alpha_2/10} - 1)}{2 \log(TW/\omega_c + 1)}. \quad (16)$$

Минимальный порядок фильтра Чебышева находится подобным образом и при $K = 1$

$$n = \frac{\text{arch}\sqrt{(10^{\alpha_2/10} - 1)(10^{\alpha_1/10} - 1)}}{\text{arch}(\omega_1/\omega_c)} \quad (17)$$

или

$$n = \frac{\text{arch}\sqrt{(10^{\alpha_2/10} - 1)(10^{\alpha_1/10} - 1)}}{\text{arch}(TW/\omega_c + 1)}. \quad (18)$$

Особенностью проектирования рассматриваемых фильтров является то, что, как правило, фильтр Чебышева обеспечивает ту же самую крутизну передаточной функции, что и фильтр Баттерворта, но увеличенной сложности.

В настоящее время существует много способов построения фильтров нижних частот. В таблице 3 [2, 8] представлены некоторые из наиболее применимых схем.

Для расчета фильтра нижних частот второго порядка или звена второго порядка, обладающего заданной частотой среза f_c и коэффициентом усиления K в полосе пропускания, необходимо выполнить следующие шаги:

1. Найти нормированные значения коэффициентов b и c в таблице Б.1 приложения Б.

2. Независимо от используемой схемы выбрать номинальное значение емкости C_1 (для получения приемлемых сопротивлений резисторов рекомендуется выбирать C_1 близким к значению $10/f_c$ (мкФ))

3. В зависимости от используемой схемы провести следующие расчеты:

– при использовании первой схемы таблицы 3 (на основе ИНУН) вначале определяют номинальное значение емкости C_2 , которое должно удовлетворять следующему условию

$$C_2 \leq \left[K - 1 + \frac{b^2}{4c} \right] C_1,$$

и номинальные значения сопротивлений R_1 и R_2 , удовлетворяющие условиям

$$R_1 = \frac{1/(\pi f_c C_1)}{b + \sqrt{b^2 + 4c(K-1) - 4cC_2/C_1}}, \quad R_2 = \left[\frac{1}{cC_1C_2R_1(2\pi f_c)^2} \right].$$

Исходя из заданного коэффициента усиления K находят сопротивления R_3 и R_4 .

Если $K = 1$, то $R_3 = \infty$, $R_4 = 0$.

Если $K > 1$, то, исходя из равенства сопротивлений для входных токов И и Н-входов ОУ, получаются соотношения

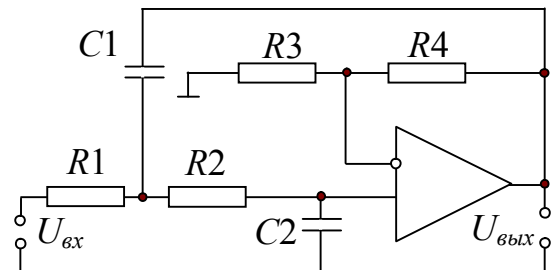
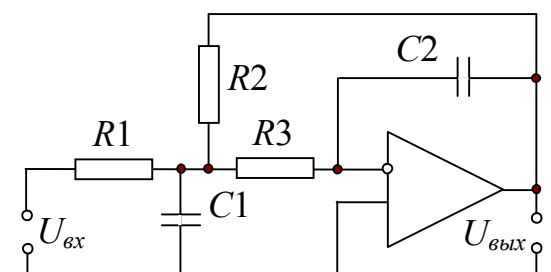
$$R_3 = \frac{K(R_1 + R_2)}{K - 1}, \quad R_4 = K(R_1 + R_2).$$

– при использовании второй схемы таблицы 3 (с многопетлевой обратной связью) расчет проводят по следующим формулам

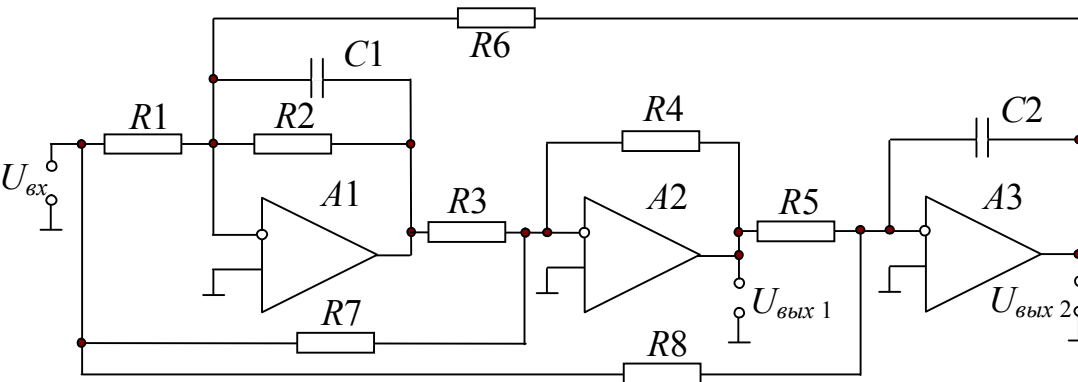
$$C_2 \leq \left[\frac{b^2 C_1}{4c(|K| + 1)} \right], \quad R_2 = \frac{(|K| + 1)/(\pi f_c C_1)}{b + \sqrt{b^2 - 4c(|K| + 1)C_2/C_1}},$$

$$R_1 = \frac{R_2}{|K|}, \quad R_3 = \left[\frac{1}{cC_1C_2(2\pi f_c)^2 R_2} \right].$$

Таблица 3 – Схемы реализации активных фильтров

| № | Название | Схема звена и его передаточная функция | Добротность |
|---|---|---|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| | <p>Активное звено второго порядка на основе неинвертирующего усилителя (на основе источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН) или структура Сален – Кея).</p> <p>Пригодно для реализации полиномиального фильтра.</p> |  $W(p) = \frac{1 + R_4/R_3}{1 + pC_2(R_1 + R_2) - pC_1R_1R_4/R_3 + p^2C_1C_2R_1R_2}$ | $Q \leq 10$ |
| | <p>Активное звено второго порядка с многопетлевой обратной связью и бесконечным коэффициентом усиления (структура Рауха), реализующее уравнение с инвертирующим коэффициентом усиления.</p> <p>Пригодно для реализации полиномиального фильтра.</p> |  $W(p) = \frac{R_2/R_1}{1 + pC_2(R_2 + R_3 + R_2R_3/R_1) + p^2C_1C_2R_2R_3}$ | $Q \leq 10$ |

Продолжение таблицы 3

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|--|-----------------------------|
| | <p>Биквадратное активное звено второго порядка.</p> <p>Пригодно для реализации как полиномиального, так и неполиномиального фильтра</p> |  $W_1(p) = \frac{U_{\text{вых1}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} =$ $= \frac{-\frac{R_5}{R_8} + pC_2 \frac{R_5 R_6}{R_2} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_3}{R_7} \right) - p^2 C_1 C_2 \frac{R_3 R_5 R_6}{R_7}}{1 + pC_2 R_3 R_5 R_6 / (R_2 R_4) + p^2 C_1 C_2 R_3 R_5 R_6 / R_4};$ $W_2(p) = \frac{U_{\text{вых2}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} =$ $= \frac{-\frac{R_6}{R_1} + \frac{R_3}{R_2} \left(\frac{R_6}{R_7} - \frac{R_5 R_6}{R_4 R_8} \right) (1 + pC_1 R_2)}{1 + pC_2 R_3 R_5 R_6 / (R_2 R_4) + p^2 C_1 C_2 R_3 R_5 R_6 / R_4}.$ | <p>$Q = 100$</p> |

– для биквадратного звена полиномиального фильтра (третий в таблице 3) выходным является напряжение $U_{вых 2}$, при этом $R_7 = \infty$, $R_8 = \infty$, $C_2 = C_1$. Далее расчет проводят следующим образом

$$R_4 = \frac{1}{2\pi f_c C_1}, R_3 = R_5 = R_4, R_1 = \frac{R_4}{Kc}, R_2 = \frac{R_4}{b}, R_6 = \frac{R_4}{c}.$$

Выходное напряжение $U_{вых 2}$ в этом случае будет соответствовать звену 2-го порядка фильтров Баттерворта, Чебышева и Бесселя.

Для биквадратного звена неполиномиальных фильтров $U_{вых} = U_{вых 1}$, а расчет проводят, пользуясь следующими формулами

$$R_1 = \frac{a}{Kbc2\pi f_c C_1}; R_2 = \frac{1}{b2\pi f_c C_1}; R_4 = R_3; R_6 = \frac{1}{2\pi f_c C_1 \sqrt{c}}; R_5 = \frac{C_1 R_6}{C_2};$$

$$R_7 = \frac{aR_3}{Kc}; R_8 = \frac{1}{K2\pi f_c C_2 \sqrt{c}}.$$

При этом C_2 и R_3 выбирают таким образом, чтобы уменьшить разброс получаемых в результате расчет сопротивлений. Для большинства случаев можно принимать $C_2 = C_1$ и $R_3 = \frac{1}{2\pi f_c C_1}$.

Если принять $R_1 R_3 = R_2 R_7$, то $U_{вых 1}$ можно использовать как выходное напряжение звена эллиптического фильтра или инверсного фильтра Чебышева.

Для воспроизведения передаточных функций более высокого порядка используют последовательное соединение звеньев 2-го порядка.

2.1.3 Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка студентов к расчетно-графической работе осуществляется в следующих направлениях:

- изучение теоретической части по теме работы по литературным источникам и лекциям;
- самостоятельная проверка степени подготовленности к работе по контрольным вопросам.

2.1.4 Контрольные вопросы

1 Дайте определение динамических характеристик. В чем отличие полных и частных динамических характеристик?

Приведите их примеры.

2 Продемонстрируйте взаимосвязь динамических характеристик.

3 Опишите первую полную динамическую характеристику, укажите особенности дифференциальных уравнений статики и динамики.

4 Приведите методику составления дифференциальных уравнений. Приведите пример.

5 Объясните, в чем заключается применение метода декомпозиции при составлении дифференциальных уравнений систем управления.

6 Укажите сущность операторного метода. Запишите математическое описание прямого и обратного преобразования Лапласа.

Приведите примеры передаточных функций типовых элементов систем.

7 Дайте определение амплитудно-фазовой характеристики, запишите её математическое представление в алгебраической и показательной форме. Каким образом можно экспериментально получить АФХ?

Приведите примеры АФХ типовых элементов систем.

8 Дайте определение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик, запишите их математическое описание, укажите способы их экспериментального получения.

Приведите примеры АЧХ и ФЧХ типовых элементов систем.

9 Дайте определение логарифмических характеристик, продемонстрируйте переход к логарифмическим характеристикам и выделите их преимущества.

Приведите примеры логарифмических характеристик типовых элементов систем.

10 Динамические свойства инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

2.1.5 Исходные данные и задание для расчетно-графической работы

В РГР проводится анализ структурной схемы системы, представленной на рисунке 5, которая является общей для всех студентов.

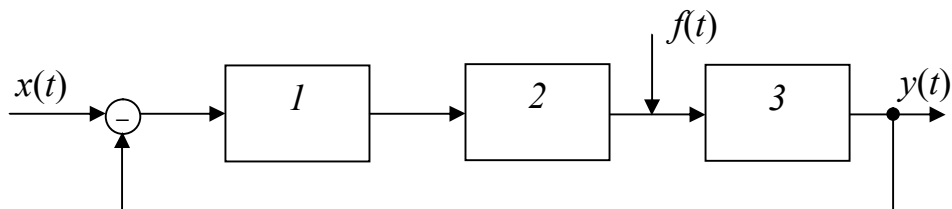


Рисунок 5 – Структурная схема исследуемой системы:

1 – усилитель; 2 – фильтр; 3 – типовое звено; $x(t)$ – входной сигнал;
 $y(t)$ – выходной сигнал; $f(t)$ – внешнее воздействие на систему

Задания на РГР носят индивидуальный характер, а исходные данные студент выбирает из таблиц В.1 и В.2 приложения В по предпоследней и последней цифрам шифра.

В расчетно-графической работе необходимо:

1 Получить аналитические выражения передаточных функций элементов исследуемой системы и записать их в виде отношения полиномов.

2 Построить АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ усилителя, фильтра нижних частот и заданного типового звена.

3 Получить выражение передаточных функций всего исследуемого устройства, используя для этого правила преобразования структурных схем.

Следует записать выражения для передаточной функции:

- разомкнутой системы;
- замкнутой системы по управлению, возмущению и ошибке.

4 Получить выражение выходного сигнала $y(t)$ и представить графически его и входной сигнал $x(t)$.

5 Получить аналитическое выражение для амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) системы, амплитудно-частотной и фазо-частотной

характеристик, логарифмических АЧХ и ФЧХ (ЛАЧХ и ЛФЧХ).

6 Построить АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемой системы.

2.1.6 Порядок расчета

1 *Получение передаточной функции усилителя и построение его динамических характеристик*

1.1 В соответствии с заданием проанализировать схему усилителя на ОУ, с учетом исходных данных провести обоснованный выбор ОУ [2, 3], рассчитать сопротивления входной цепи ОУ и цепи обратной связи, обеспечивающие заданный коэффициент преобразования, и выбрать стандартные значения сопротивлений [9, 10].

Привести параметры выбранного ОУ и резисторов.

1.2 Используя литературные источники [2, 3, 11, 12] и материал теоретической части методических указаний, получить передаточную функцию усилителя с учетом инерционных свойств ОУ и записать ее в виде отношения полиномов.

1.3 Получить аналитические выражения для динамических характеристик усилителя: АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ.

1.4 Построить АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ усилителя.

1.4.1 В среде MathCAD это выглядит следующим образом:

$f := 0, 0.01 .. 1000$

Значение частоты среза, Гц:

$f_c := 0.5$

Значения круговой частоты среза, рад/с:

$\omega_c := 2 \cdot \pi \cdot f_c \quad \omega_c = 3.142$

$\omega(f) := 2 \cdot \pi \cdot f \quad i := \sqrt{-1}$

Передаточная функция системы:

$$W(p) := \frac{25}{0.02p + 1}$$

АФХ системы:

$$W(f) := \frac{25}{0.02i \cdot \omega(f) + 1}$$

Значения действительной и мнимой части:

$$M(f) := \operatorname{Re}(W(f))$$

$$N(f) := \operatorname{Im}(W(f))$$

1.4.2 Построение АЧХ усилителя

Далее возможны два варианта получения амплитудно-частотной характеристики:

– используя выражения для действительной и мнимой частей амплитудно-фазовой характеристики:

Модуль комплексного коэффициента преобразования:

$$\operatorname{MOD}W(f) := \sqrt{M(f)^2 + N(f)^2}$$

$$\operatorname{АЧХ}(f) := \operatorname{MOD}W(f)$$

– используя непосредственно возможности MathCAD при нахождении модуля функции:

Модуль комплексного коэффициента преобразования:

$$\operatorname{АЧХ}(f) := |W(f)|$$

Полученные результаты будут абсолютно одинаковы, что хорошо видно по графикам АЧХ, полученным разными способами и приведенным в приложении Г (рисунки Г.1 и Г.2).

1.4.3 Построение ФЧХ усилителя

При построении ФЧХ также возможны два варианта получения частотной характеристики:

– используя выражения для действительной и мнимой частей амплитудно-фазовой характеристики:

Аргумент комплексного коэффициента преобразования:

$$\operatorname{ФЧХ}(f) := \operatorname{atan}\left(\frac{N(f)}{M(f)}\right)$$

– используется стандартную команду MathCAD $\arg(Z)$:

Аргумент комплексного коэффициента преобразования:

$$\Phi\text{ЧХ}(f) := \arg(W(f))$$

Полученные результаты также будут абсолютно одинаковы, что хорошо видно по графикам $\Phi\text{ЧХ}$, полученным разными способами, приведенными в приложении Г (рисунки Г.3 и Г.4).

1.4.4 Построение АФХ усилителя

Может вестись двумя способами в зависимости от того, каким образом проводились предыдущие расчеты.

Построить амплитудно-фазовую характеристику можно в комплексной плоскости прямоугольных координат, когда по оси x откладывается действительная часть АФХ, а по оси y – мнимая.

Если построение ведется в полярных координатах, то в качестве модуля и аргумента применяются АЧХ и $\Phi\text{ЧХ}$ исследуемого элемента или системы.

Полученные графики будут идентичны, и это иллюстрируется в приложении Г (рисунки Г.5 и Г.6).

1.4.5 Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ

Проводится из условия, что логарифмические характеристики связаны с уже полученными АЧХ и $\Phi\text{ЧХ}$. В среде MathCAD это выглядит следующим образом:

$$\text{ЛАЧХ}(f) := 20\log(\text{АЧХ}(f))$$

Причем следует помнить, что при построении логарифмической АЧХ следует выбрать логарифмическую ось x , так как логарифмируются обе оси.

Логарифмическая фазо-частотная характеристика отличается от обычной только тем, что, как и в предыдущем случае, логарифмируется ось x .

Пример построение этих характеристик приведен в приложении Г (рисунки Г.7 и Г.8).

2 Получение передаточной функции фильтра нижних частот и построение его динамических характеристик

2.1 На основании исходных данных провести обоснованный выбор

фильтра нижних частот, обеспечивающего выполнение заданных требований (таблица 2) [2, 8].

2.2 В зависимости от типа фильтра выбрать или рассчитать порядок ФНЧ.

2.3 Выбрать схему реализации активного фильтра нижних частот (таблица 3) [2, 8].

2.4 Рассчитать элементы фильтра по методике приведенной в теоретической части методических указаний [2, 8], и выбрать стандартные значения сопротивлений и емкостей [9, 10].

С учетом исходных данных провести обоснованный выбор ОУ [2, 3], и привести параметры выбранного ОУ, резисторов и конденсаторов.

2.5 Используя литературные источники [2, 8] и материал теоретической части методических указаний, записать передаточную функцию ФНЧ и записать ее в виде отношения полиномов.

2.6 Получить аналитические выражения для АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ фильтра нижних частот.

2.7 Построить АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ фильтра нижних частот, используя методику, рассмотренную при построении динамических характеристик усилителя.

3 Получение передаточной функции типового звена и построение его динамических характеристик

3.1 На основании исходных данных выбрать типовое звено (таблица 1).

3.2 С учетом заданных параметров разрабатываемой схемы рассчитать ее элементы и выбрать стандартные значения сопротивлений и емкостей [9, 10], входящих в реализуемой схемой дифференциальное уравнение.

С учетом исходных данных провести обоснованный выбор ОУ [2, 3], и привести параметры выбранного ОУ, резисторов и конденсаторов.

3.3 Осуществить переход к операторной форме записи дифференциального уравнения, реализуемого заданной схемой (таблица 1).

3.4 Получить передаточную функцию типового звена из операторной формы записи дифференциального уравнения и записать ее в виде отношения

ПОЛИНОМОВ.

3.5 Получить аналитические выражения для АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ заданного типового звена.

3.6 Построить АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ заданного типового звена, используя методику, рассмотренную при построении динамических характеристик усилителя.

4 Получение общей передаточной функции системы

Используя правила преобразования структурных схем, получить общую передаточную функцию устройства, состоящего из вышеперечисленных элементов.

Записать аналитические выражения для:

- передаточной функции разомкнутой системы;
- передаточной функции замкнутой системы по управлению;
- передаточной функции замкнутой системы по возмущению;
- передаточной функции замкнутой системы по ошибке.

5 Получение выходного сигнала системы $y(t)$

Для получения выходного сигнала $y(t)$ можно воспользоваться следующим алгоритмом действий:

- Нахождение аналитического выражения комплексного спектра выходного сигнала $y(\omega)$ проводится на основании известной зависимости

$$y(\omega) = x(\omega)W(\omega)$$

где $x(\omega)$ – аналитическое выражение комплексного спектра входного сигнала;

$W(\omega)$ – аналитическое выражение комплексного спектра передаточной функции.

- Для получения аналитического выражения комплексного спектра входного сигнала, например вида $x(t) = \cos(6 \cdot 10^3 t)$, следует воспользоваться прямым преобразованием Лапласа. В среде MathCAD это выглядит следующим образом:

$$x := \cos(6 \cdot 10^3 t),$$

$$\text{laplace}(x(t), t, p) \rightarrow \frac{p}{p^2 + 36000000}$$

Таким образом, получаем изображение входного сигнала

$$x(p) = \frac{p}{p^2 + 36000000}.$$

– Перемножив полученное выражение и передаточную функцию системы, например вида

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{25}{0,02p + 1},$$

получим выражение, представляющее изображение выходного сигнала

$$y(p) = \left(\frac{p}{p^2 + 36000000} \right) \left(\frac{25}{0,02p + 1} \right).$$

– Для получения выходного сигнала $y(t)$ воспользуемся обратным преобразованием Лапласа. В среде MathCAD существует специальная функция *invlaplace*, выводящая требуемый результат. Применив данную функцию для выражения $y(p)$, получим аналитическое выражение выходного сигнала.

В среде MathCAD это выглядит следующим образом:

$$y(p) := \left(\frac{p}{p^2 + 36000000} \right) \left(\frac{25}{0,02p + 1} \right),$$

$$\begin{aligned} \text{invlaplace}(y(p), p, t) \rightarrow & -1,73599 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-50 \cdot t) + \\ & + 1,73599 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(6000 \cdot t) + 0,20832 \cdot \sin(6000 \cdot t) \end{aligned}$$

Таким образом, получаем аналитическое выражение для выходного сигнала исследуемой системы

$$\begin{aligned} y(t) = & -1,73599 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-50 \cdot t) + 1,73599 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(6000 \cdot t) + \\ & + 0,20832 \cdot \sin(6000 \cdot t). \end{aligned}$$

– В завершении этого этапа РГР следует вывести графики функций $x(t)$ и $y(t)$.

6 Построение динамических характеристик исследуемой системы

Используя передаточную функцию по управлению и методику, рассмотренную при построении динамических характеристик усилителя построить АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ всей исследуемой системы.

2.1.7 Содержание отчета по расчетно-графической работе

Отчет должен содержать:

- исходные данные;
- структурную схему исследуемой системы;
- результаты расчетов элементов принципиальной схемы;
- обоснование выбора операционных усилителей, резисторов и конденсаторов;
- параметры выбранных элементов;
- принципиальная схема исследуемой системы;
- последовательность преобразований исходной структурной схемы при получении общей передаточной функции системы;
- аналитические выражения передаточной функции и всех частотных характеристик, причем как отдельных элементов, так и всей системы в целом;
- графические зависимости частотных характеристик элементов и всей системы в целом;
- выводы по результатам проведенных исследований.

2.2 Расчетно-графическая работа №2

Исследование устойчивости системы

2.2.1 Цель работы

Закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях по разделу: “Устойчивость систем управления” и формирование практических навыков по анализу устойчивости систем с использованием различных критериев устойчивости, что должно быть положено в основу практической деятельности по проектированию систем медицинского назначения.

2.2.2 Теоретическая часть расчетно-графической работы

Устойчивость операционных схем с обратной связью, особенно быстродействующих усилителей, – это достаточно сложный вопрос, так как при увеличении частоты из-за влияния паразитных емкостей транзисторов одновременно с падением коэффициента усиления увеличивается и фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями. Поэтому на некоторой критической частоте отрицательная обратная связь превращается в положительную, и усилитель самовозбуждается, т. е. становится генератором незатухающих колебаний [11, 12].

Так как операционный усилитель представляет собой многокаскадный усилитель с очень большим коэффициентом усиления, то вероятность его самовозбуждения при введении отрицательной обратной связи весьма велика. Появление автоколебаний (самовозбуждения) означает полный выход схемы из-под контроля, в результате чего ошибки возрастают до сотен процентов, и операционная схема становится бесполезной. Устойчивость усилителя, охваченного цепью отрицательной обратной связи, может так же существенно ухудшиться, если он нагружен на полное сопротивление, имеющее емкостный характер. Вообще реальная операционная схема часто имеет тенденцию к самовозбуждению, а не усилению сигналов. Кроме этого общая точность, качество элемен-

тов во всей петле обратной связи, включая операционный усилитель, накладывают дополнительные ограничения.

В любом случае, устойчивость операционной схемы будет достигаться ценой ухудшения ее динамики. Если широкая полоса частот порядка 1...10 МГц – это основное требование, в то время как точность (1 или даже 10 %) всего лишь второстепенное, то лучше использовать усилитель без внешней обратной связи с локальными внутренними обратными связями, чем операционный усилитель, охваченный петлей обратной связи. Вследствие всего вышесказанного для обеспечения устойчивости ОУ необходимо принимать специальные меры.

Устойчивость ОУ наиболее часто оценивают с помощью логарифмических амплитудно-частотной (ЛАЧХ) и фазо-частотной (ЛФЧХ) характеристик. Для удобства анализа характеристики аппроксимируют в виде прямых, что показано на рисунке 6 [12].

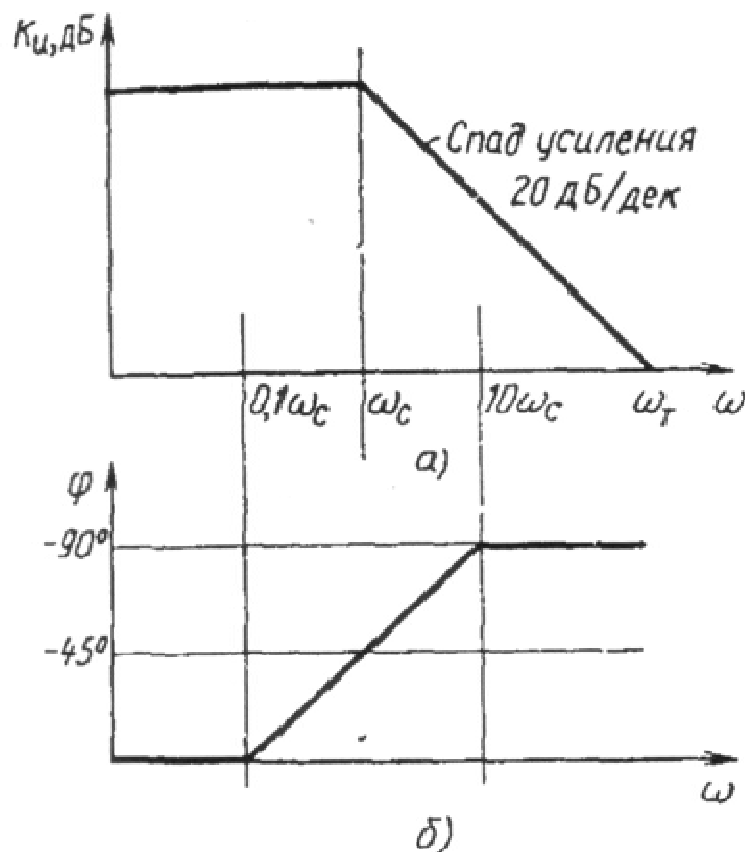


Рисунок 6 – Логарифмические АЧХ (а) и ФЧХ (б)

АЧХ представляет собой горизонтальную линию на уровне $20 \lg K_U$ (рисунок 6, а). На частоте среза ω_c происходит излом и при $\omega > \omega_c$ АЧХ представляет собой прямую с наклоном 20 дБ при изменении частоты в 10 раз, т.е. 20 дБ на декаду. Таким образом, скорость спада АЧХ, построенная для одного каскада при $\omega > \omega_c$, равна 20 дБ/дек.

Частота среза, соответствующая излому аппроксимированной АЧХ, приблизительно равна граничной частоте усиления в реальной АЧХ. Максимальная погрешность их равенства при аппроксимации АЧХ составляет 3 дБ.

Построенную с помощью аналитического выражения ФЧХ (рисунок 6, б) также можно аппроксимировать в виде прямой, проведенной от точки $\omega = 0,1\omega_c$ ($\varphi = 0$) до точки $\omega = 10\omega_c$, в которой $\varphi = 90^\circ$. На частотах $\omega > 10\omega_c$ ФЧХ представляется горизонтальной прямой на уровне $\varphi = 90^\circ$. При такой идеализации отклонение от реальной ФЧХ составляет не больше $5,7^\circ$.

Амплитудно-частотная характеристика многокаскадного усилителя строится путем суммирования АЧХ отдельных его каскадов и имеет несколько изломов, число которых соответствует количеству каскадов.

Фазо-частотная характеристика многокаскадного усилителя строится путем суммирования фазовых характеристик отдельных каскадов с построенной выше АЧХ.

При введении отрицательной обратной связи угол сдвига между выходным и входным напряжениями усилителя должен составлять 180° , если четырехполюсник обратной связи не имеет реактивных элементов, т. е. $\varphi_\beta = 0$.

При положительной обратной связи с учетом $\varphi_\beta = 0$ имеем угол сдвига между выходным и входным напряжениями усилителя, равный 2π .

Таким образом, чтобы за счет реактивных элементов усилителя отрицательная обратная связь стала положительной, дополнительный фазовый сдвиг должен составлять 180° . Для обеспечения запаса устойчивости усилителя по фазе принимаем, что сдвиг не должен превышать 135° . Тогда можно считать, что область устойчивости работы многокаскадного усилителя, в ча-

стности ОУ, при введении отрицательной обратной связи определяется участком АЧХ со спадом 20 дБ/дек.

При глубокой отрицательной обратной связи

$$K_{uoc} = \frac{1}{\beta}.$$

Для повышения устойчивости ОУ при введении глубокой отрицательной обратной связи проводится частотная коррекция АЧХ с помощью пассивных RC -цепей, включаемых в схему операционного усилителя. Корректирующие цепи изменяют АЧХ таким образом, что ее спад на всех частотах составляет 20 дБ/дек. Наиболее просто осуществить коррекцию АЧХ, включив в схему ОУ конденсатор достаточно большой емкости так, чтобы постоянная времени корректирующей цепи превышала постоянную времени усилителя, охваченного обратной связью. Тогда АЧХ усилителя сдвинется влево, и точка, соответствующая ее частоте среза, будет определяться уже величиной введенной емкости.

В настоящее время промышленностью выпускаются ОУ общего применения, при разработке принципиальных схем которых учтено использование корректирующего конденсатора. Такие ОУ, называемые усилителями с внутренней коррекцией, не требуют дополнительных корректирующих элементов и устойчивы при любой глубине обратной связи во всем диапазоне рабочих частот. Однако существенным ограничением применения таких усилителей является их узкая полоса пропускания.

Если необходимо усиливать сигналы высокой частоты, то используют ОУ с внешней коррекцией, когда усилитель имеет дополнительные внешние выводы для подключения корректирующих цепей. Эти выводы позволяют выбрать оптимальную коррекцию АЧХ усилителя путем подключения к выводам коррекции навесных конденсаторов или RC -цепей. В спецификациях изготовителей ОУ обычно приводится инструкция по применению цепей внешней коррекции.

Анализ устойчивости любой системы направлен на поиск ответов на три вопроса:

- 1 Устойчива ли данная система с обратной связью (абсолютная устойчивость)?
- 2 Насколько она устойчива (каков ее запас устойчивости)?
- 3 Насколько далека операционная схема от неустойчивого состояния?

2.2.3 Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка студентов к расчетно-графической работе осуществляется в следующих направлениях:

- изучение теоретической части по теме работы по литературным источникам и лекциям;
- самостоятельная проверка степени подготовленности к работе по контрольным вопросам.

2.2.4 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение понятию “устойчивость”. Приведите примеры переходных характеристик устойчивых и неустойчивых систем, когда проявляется колебательная и апериодическая составляющие переходных характеристик.
- 2 Каково расположение корней характеристического уравнения системы на комплексной плоскости в зависимости от ее устойчивости.
- 3 Что такое критический коэффициент усиления?
- 4 Сформулируйте алгебраический критерий устойчивости Гурвица.
- 5 Укажите, каким образом с помощью критерия Гурвица можно определить критический коэффициент усиления.
- 6 Сформулируйте частотный критерий устойчивости А.В. Михайлова.
- 7 Укажите, каким образом с помощью критерия Михайлова можно определить критический коэффициент усиления.

8 Сформулируйте амплитудно-фазовый критерий устойчивости Найквиста.

9 Укажите, каким образом с помощью этого критерия можно определить запас устойчивости системы по модулю и по фазе.

10 Дайте определение понятиям “запас устойчивости системы по модулю” и “запас устойчивости системы по фазе”.

11 Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста применительно к логарифмическим характеристикам.

12 Укажите, каким образом с помощью критерия Найквиста можно определить запас устойчивости системы по модулю и по фазе по логарифмическим характеристикам.

2.2.5 Исходные данные и задание для расчетно-графической работы

В РГР проводится анализ устойчивости системы структурная схема, которой исследовалась в расчетно-графической работе № 1. Поэтому студент для выполнения РГР использует передаточные функции, полученные им в процессе выполнения первой работы, т.е. исследует устойчивость системы, динамические характеристики которой были им уже построены.

В расчетно-графической работе № 2 необходимо:

1 Определить устойчивость системы по алгебраическому критерию Гурвица. Рассчитать критический коэффициент усиления системы по критерию Гурвица. Сделать вывод об устойчивости системы в соответствии с критерием Гурвица.

2 Определить устойчивость системы по частотному критерию Михайлова. Рассчитать и определить графически критический коэффициент усиления системы по критерию Михайлова. Сделать вывод об устойчивости системы в соответствии с критерием Михайлова.

3 Определить устойчивость системы по амплитудно-фазовому критерию Найквиста. Рассчитать запас устойчивости системы по модулю и по фазе. Сделать вывод об устойчивости системы в соответствии с критерием Найквиста.

4 Определить устойчивость системы по критерию Найквиста, применив его к логарифмическим характеристикам. Рассчитать запас устойчивости системы по модулю и по фазе. Сделать вывод об устойчивости системы в соответствии с этим критерием.

2.2.6 Порядок расчета

1 Анализ устойчивости системы по критерию Гурвица

1.1 Используя передаточную функцию замкнутой системы определить характеристическое уравнение и по нему в соответствии с критерием Гурвица оценить устойчивость системы [4-7].

1.2 Рассчитать критический коэффициент усиления системы. Сделать вывод о существующем запасе.

1.3 Сделать вывод об устойчивости системы..

2 Анализ устойчивости системы по критерию Михайлова

2.1 Используя передаточную функцию замкнутой системы определить характеристическое уравнение и по нему в соответствии с критерием Михайлова оценить устойчивость системы [4-7].

Привести таблицу, содержащую данные для построения годографа Михайлова. Построить годограф Михайлова.

2.2 Рассчитать и определить графически по годографу критический коэффициент усиления системы. Сделать вывод о существующем запасе.

2.3 Сопоставить полученный результат с расчетом критического коэффициента усиления, сделанным по критерию Гурвица.

2.4 Сделать вывод об устойчивости системы.

3 Анализ устойчивости системы по критерию Найквиста

3.1 Используя передаточную функцию разомкнутой системы осуществить переход к частотным характеристикам и получить аналитическое выражение для АФХ разомкнутой системы [4-7]. Построить АФХ разомкнутой системы.

3.2 По полученному годографу определить графически запас устойчивости системы по модулю и по фазе. Показать на годографе определенные запасы.

3.3 Сделать вывод об устойчивости системы.

4 *Анализ устойчивости системы по критерию Найквиста применительно к логарифмическим характеристикам*

4.1 Используя аналитическое выражение для АФХ разомкнутой системы получить зависимости для ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы [4-7].

Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы.

4.2 По полученным характеристикам определить графически запас устойчивости системы по модулю и по фазе. Показать на характеристиках определенные запасы.

4.3 Сделать вывод об устойчивости системы в соответствии с критерием Найквиста, применив его к логарифмическим характеристикам.

2.2.7 Содержание отчета по расчетно-графической работе

Отчет должен содержать:

- исходные данные;
- структурную схему исследуемой системы;
- результаты расчетов критериев устойчивости, доказывающие выполнение всех обязательных условий;
- графические зависимости частотных характеристик при анализе системы по частотным критериям;
- указание всех параметров на графиках, при определении их графическим способом;
- выводы по результатам проведенных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам. – М.: Издательство стандартов, 1995.
- 2 Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 304 с.: ил.
- 3 Гусев, В.Г. Электроника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.: ил.
- 4 Фролов В.Н. Управление в биологических и медицинских системах: Учебное пособие / Под ред. Я.Е. Львовича и М.В. Фролова – Воронеж, 2001. – 327 с.
- 5 Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.: ил.
- 6 Солодовников В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования./ Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. – М. Машиностроение, 1985 – 536 с.: ил.
- 7 Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов, М.Г. Косов, С.П. Протопопов и др. Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш. шк., 2000. – 268 с.: ил.
- 8 Джонсон, Д. Справочник по активным фильтрам / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатом издат, 1983. – 94 с.
- 9 Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник. / Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок. – Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.: ил.
- 10 Резисторы: Справочник / Под ред. И.И. Четвертакова. – М.: Энергоатомиздат, 1981.– 352 с.: ил.
- 11 Достал, И. Операционные усилители: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 512 с.; ил.
- 12 Королев, Г.В. Электронные устройства автоматики. – М.: высшая школа, 1991. – 256 с.; ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Форма титульного листа отчета по РГР

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»

Кафедра «Приборостроение,
метрология и сертификация»

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА №__

(название расчетно-графической работы)

по дисциплине: Управление в биологических и медицинских
системах

Студент: _____

Шифр: _____ Группа: _____

Допущен к защите работе: «__» _____ 202__ г.

(подпись преподавателя)

Отметка о зачете: «__» _____ 202__ г.

(подпись преподавателя)

Орел, 202__ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Характеристики активных фильтров различного типа

Таблица Б.1 – Безразмерные коэффициенты a , b и c

| Порядок фильтра | | | 2 | 4 | | 6 | | |
|--|-----|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номер звена | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| Фильтр Баттерворта | b | | 1,4142 | 0,7654 | 1,8478 | 0,5176 | 1,4142 | 1,9319 |
| | c | | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| Фильтр Чебышева, $\alpha_1 = 0,5$ дБ | b | | 1,4256 | 0,3507 | 0,8467 | 0,1553 | 0,4243 | 0,5796 |
| | c | | 1,5162 | 1,0635 | 0,3564 | 1,0230 | 0,5900 | 0,1570 |
| Фильтр Чебышева, $\alpha_1 = 1,0$ дБ | b | | 1,0977 | 0,2791 | 0,6737 | 0,1244 | 0,3398 | 0,4641 |
| | c | | 1,1025 | 0,9865 | 0,2794 | 0,9907 | 0,5577 | 0,1247 |
| Фильтр Чебышева, $\alpha_1 = 2,0$ дБ | b | | 0,8038 | 0,2098 | 0,5064 | 0,0939 | 0,2567 | 0,3506 |
| | c | | 0,8231 | 0,9287 | 0,2216 | 0,9660 | 0,5329 | 0,0999 |
| Инверсный фильтр Чебышева, $\alpha_2 = -40$ дБ | a | | 100,99 | 4,7485 | 27,676 | 2,1487 | 4,0094 | 29,927 |
| | b | | 1,4141 | 0,6892 | 2,0315 | 0,3791 | 1,3338 | 2,5582 |
| | c | | 1,0099 | 1,0375 | 1,2667 | 1,0346 | 1,3323 | 1,8705 |
| Эллиптический фильтр, $\alpha_1 = 0,5$ дБ, $\alpha_2 = -40$ дБ | a | | 143,63 | 3,0091 | 14,910 | 1,3095 | 9,9655 | 1,8557 |
| | b | | 1,4180 | 0,9071 | 0,2719 | 0,7701 | 0,3058 | 0,0650 |
| | c | | 1,5214 | 0,4478 | 1,0614 | 0,3176 | 0,7965 | 1,0142 |
| Эллиптический фильтр, $\alpha_1 = 2,0$ дБ, $\alpha_2 = -40$ дБ | a | | 65,875 | 2,2207 | 10,214 | 1,5696 | 7,6393 | 1,1786 |
| | b | | 0,7987 | 0,5545 | 0,1518 | 0,4905 | 0,1704 | 0,0317 |
| | c | | 0,8293 | 0,2991 | 0,9548 | 0,2315 | 0,7759 | 0,9905 |
| Фильтр Бесселя | b | | 3,0000 | 5,7924 | 4,2076 | 5,0319 | 8,4967 | 7,4714 |
| | c | | 3,0000 | 9,1401 | 11,488 | 26,514 | 18,801 | 20,853 |

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)
Исходные данные для расчетно-графической работы

Таблица В.1 – Виды входных сигналов

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | $x(t)=0,1(1-100t) \times e^{-100t}$ | $x(t)=0,125 \times \cos(10 \cdot 10^5 t)$ | $x(t)=0,0045 e^{-t} \times \cos(10t)$ | $x(t)=0,005 + 0,005 \sin(10^4 t)$ | $x(t)=0,0025 \times \cos(5,8 \cdot 10^4 t) + 0,003 \sin(4,5 \cdot 10^4 t)$ |
| 2 | $x(t)=0,2(1-150t) \times e^{-120t}$ | $x(t)=0,225 \times \cos(25 \cdot 10^5 t)$ | $x(t)=0,0055 e^{-0,9t} \times \cos(200t)$ | $x(t)=0,005 + 0,002 \sin(9 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0055 \times \cos(0,08 \cdot 10^3 t) + 0,003 \sin(1,5 \cdot 10^3 t)$ |
| 3 | $x(t)=0,3(1-200t) \times e^{-140t}$ | $x(t)=0,375 \times \cos(36 \cdot 10^4 t)$ | $x(t)=0,0065 e^{-0,8t} \times \cos(3 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,001 + 0,005 \sin(8 \cdot 10^4 t)$ | $x(t)=0,003 \times \cos(7,8 \cdot 10^3 t) + 0,003 \sin(6,8 \cdot 10^3 t)$ |
| 4 | $x(t)=0,4(1-250t) \times e^{-160t}$ | $x(t)=0,425 \times \cos(25 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0075 e^{-0,7t} \times \cos(4 \cdot 10^4 t)$ | $x(t)=0,045 + 0,005 \sin(6 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,005 \times \cos(6,3 \cdot 10^3 t) + 0,005 \sin(4,9 \cdot 10^3 t)$ |
| 5 | $x(t)=0,5(1-300t) \times e^{-180t}$ | $x(t)=0,555 \times \cos(23 \cdot 10^4 t)$ | $x(t)=0,0085 e^{-0,6t} \times \cos(5 \cdot 10^5 t)$ | $x(t)=0,005 + 0,05 \sin(980t)$ | $x(t)=0,0045 \times \cos(5,85 \cdot 10^4 t) + 0,004 \sin(2,8 \cdot 10^3 t)$ |

Продолжение таблицы В.1

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------|--|------------------------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| 1 | $x(t)=0,002[1+\sin(10t)]\times$ $\times\sin(4\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(10^4t)$ | $x(t)=\delta(t,k)$ | $x(t)=0,001\sin 10t+$ $+0,1\sin(100t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(0,5t)$ |
| 2 | $x(t)=0,0042[1+0,9\times$ $\times\sin(40t)]\sin(3\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(10^5t)$ | $x(t)=0,09\delta(t,k)$ | $x(t)=0,002\sin 10^2t+$ $+0,2\sin(90t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(5t)$ |
| 3 | $x(t)=0,042[1+0,8\times$ $\times\sin(70t)]\sin(2\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(10^3t)$ | $x(t)=0,08\delta(t,k)$ | $x(t)=0,003\sin 10^3t+$ $+0,3\sin(80t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(50t)$ |
| 4 | $x(t)=0,0086[1+0,7\times$ $\times\sin(100t)]\sin(5\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(2\cdot 10^3t)$ | $x(t)=0,07\delta(t,k)$ | $x(t)=0,004\sin 10^4t+$ $+0,4\sin(70t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(500t)$ |
| 5 | $x(t)=0,0036[1+0,6\times$ $\times\sin(110t)]\sin(5\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(5\cdot 10^3t)$ | $x(t)=0,06\delta(t,k)$ | $x(t)=0,005\sin 10^5t+$ $+0,5\sin(60t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(50t)$ |

Продолжение таблицы В.1

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | $x(t)=0,6(1-350t) \times e^{-200t}$ | $x(t)=0,625 \times \cos(0,85 \cdot 10^5 t)$ | $x(t)=0,0095e^{-0,5t} \times \cos(560t)$ | $x(t)=0,055 + 0,045 \sin(10^3 t)$ | $x(t)=0,0015 \times \cos(2,36 \cdot 10^3 t) + 0,001 \sin(1,9 \cdot 10^4 t)$ |
| 7 | $x(t)=0,7(1-400t) \times e^{-220t}$ | $x(t)=0,775 \times \cos(3 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0035e^{-0,4t} \times \cos(120t)$ | $x(t)=0,005 + 0,008 \sin(3 \cdot 10^4 t)$ | $x(t)=0,001 \times \cos(0,54 \cdot 10^4 t) + 0,001 \sin(1,9 \cdot 10^4 t)$ |
| 8 | $x(t)=0,8(1-450t) \times e^{-240t}$ | $x(t)=0,815 \times \cos(45 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0025e^{-0,3t} \times \cos(10^4 t)$ | $x(t)=0,004 + 0,006 \sin(5 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0025 \times \cos(0,98 \cdot 10^4 t) + 0,006 \sin(0,9 \cdot 10^4 t)$ |
| 9 | $x(t)=0,9(1-500t) \times e^{-260t}$ | $x(t)=0,925 \times \cos(0,56 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0015e^{-0,2t} \times \cos(38 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,002 + 0,07 \sin(23 \cdot 10^3 t)$ | $x(t)=0,0034 \times \cos(1,98 \cdot 10^5 t) + 0,003 \sin(1,9 \cdot 10^5 t)$ |
| 0 | $x(t)=(1-550t) \times e^{-280t}$ | $x(t)=1,125 \times \cos(800t)$ | $x(t)=0,0005e^{-0,1t} \times \cos(580t)$ | $x(t)=0,001 + 0,002 \sin(100t)$ | $x(t)=0,0025 \times \cos(1,98 \cdot 10^3 t) + 0,008 \sin(1,9 \cdot 10^3 t)$ |

Продолжение таблицы В.1

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| 6 | $x(t)=0,0009[1+0,5\times \sin(150t)]\sin(9\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(8\cdot 10^3t)$ | $x(t)=0,05\delta(t,k)$ | $x(t)=0,006\sin 10^4t+0,6\sin(50t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(5t)$ |
| 7 | $x(t)=0,005[1+0,4\times \sin(20t)]\sin(8\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(7\cdot 10^3t)$ | $x(t)=0,04\delta(t,k)$ | $x(t)=0,007\sin 10^3t+0,7\sin(40t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(0,5t)$ |
| 8 | $x(t)=0,007[1+0,3\times \sin(50t)]\sin(7\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(2\cdot 10^4t)$ | $x(t)=0,03\delta(t,k)$ | $x(t)=0,008\sin 10^2t+0,8\sin(30t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(5t)$ |
| 9 | $x(t)=0,003[1+0,2\times \sin(130t)]\sin(6\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(5\cdot 10^4t)$ | $x(t)=0,02\delta(t,k)$ | $x(t)=0,009\sin 10t+0,9\sin(20t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(50t)$ |
| 0 | $x(t)=0,0025[1+0,1\times \sin(90t)]\sin(5\cdot 10^3t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\sin(2\cdot 10^5t)$ | $x(t)=0,01\delta(t,k)$ | $x(t)=0,01\sin 10^3t+\sin(10t)$ | $x(t)=\delta(t,k)\cos(500t)$ |

Таблица В.2 – Исходные данные для синтеза системы (см. комментарии в конце таблицы)

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|---------------------------|---|--|--|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$. <i>ТЗ:</i> № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,001$. | <i>У:</i> рис.2, <i>б</i> ; $K_H=2$. <i>Ф:</i> $K=2$, $\alpha_1=3$. <i>ТЗ:</i> № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$. | <i>У:</i> рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=2$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 3, $\tau_1=2$; $\tau_2=0,003$. | <i>У:</i> рис.1, <i>б</i> ; $K_H=1,8$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=2$. <i>ТЗ:</i> № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,004$. | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,02$. |
| 2 | <i>У:</i> рис.1, <i>б</i> ; $K_H=3$. <i>Ф:</i> $K=2$, $\alpha_1=1$. <i>ТЗ:</i> № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,005$. | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=2$, $\alpha_1=-40$. <i>ТЗ:</i> № 3, $\tau_1=2$; $\tau_2=0,006$. | <i>У:</i> рис.2, <i>б</i> ; $K_H=2,4$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$. <i>ТЗ:</i> № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,007$. | <i>У:</i> рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=3$. <i>ТЗ:</i> № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,008$; $\tau_2=0,007$. | <i>У:</i> рис.1, <i>б</i> ; $K_H=2,6$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 6, $\tau_1=0,003$; $\tau_2=0,05$; $\tau_3=0,009$. |
| 3 | <i>У:</i> рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=2$, $\alpha_1=2$. <i>ТЗ:</i> № 3, $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,01$. | <i>У:</i> рис.1, <i>б</i> ; $K_H=1,9$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,02$. | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=1$. <i>ТЗ:</i> № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,03$; $\tau_2=0,02$. | <i>У:</i> рис.2, <i>б</i> ; $K_H=1,8$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 6, $\tau_1=0,001$; $\tau_2=0,04$; $\tau_3=0,02$. | <i>У:</i> рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$. <i>ТЗ:</i> № 7, $\tau_1=0,009$; $\tau_2=0,02$; $\tau_3=0,05$. |
| 4 | <i>У:</i> рис.2, <i>б</i> ; $K_H=4$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=3$. <i>ТЗ:</i> № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,06$. | <i>У:</i> рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,07$; $\tau_2=0,002$. | <i>У:</i> рис.1, <i>б</i> ; $K_H=1,6$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=2$. <i>ТЗ:</i> № 6, $\tau_1=0,08$; $\tau_2=0,08$; $\tau_3=0,05$. | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 7, $\tau_1=0,07$; $\tau_2=0,09$; $\tau_3=0,04$. | <i>У:</i> рис.2, <i>б</i> ; $K_H=1,7$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=1$. <i>ТЗ:</i> № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,05$; $\xi=0,9$. |
| 5 | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,2$; $\tau_2=0,02$. | <i>У:</i> рис.2, <i>б</i> ; $K_H=1,8$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=0,5$. <i>ТЗ:</i> № 6, $\tau_1=0,006$; $\tau_2=0,2$; $\tau_3=0,05$. | <i>У:</i> рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=3$. <i>ТЗ:</i> № 7, $\tau_1=0,52$; $\tau_2=0,3$; $\tau_3=0,2$. | <i>У:</i> рис.1, <i>б</i> ; $K_H=1,4$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. <i>ТЗ:</i> № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,4$; $\xi=0,7$. | <i>У:</i> рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. <i>Ф:</i> $K=1$, $\alpha_1=2$. <i>ТЗ:</i> № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,07$; $\tau_2=0,4$; $\xi=0,8$. |

Продолжение таблицы В.2

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|------------------------------|---|---|--|---|--|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| 1 | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=1,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,06$; $\tau_2=0,5$; $\tau_3=0,02$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,05$; $\tau_2=0,6$; $\tau_3=0,1$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=2,1$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,02$; $\xi=0,5$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,06$; $\tau_2=0,6$; $\xi=0,6$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,2$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,7$. |
| 2 | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,02$; $\tau_2=0,02$; $\tau_3=0,02$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,3$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,05$; $\xi=0,4$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,8$; $\tau_2=0,02$; $\xi=0,3$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=2,4$. Ф: $K=2$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,9$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,001$. |
| 3 | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=4$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$; $\xi=0,5$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,003$; $\xi=0,4$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,6$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,004$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,005$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=2,7$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,006$; $\tau_2=0,02$. |
| 4 | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,007$; $\tau_2=0,02$; $\xi=0,6$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=4$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,008$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,009$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,8$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,005$; $\tau_2=0,01$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,02$. |
| 5 | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,03$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=3,1$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,04$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,05$; $\tau_2=0,05$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,9$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,06$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,07$; $\tau_2=0,07$. |

Продолжение таблицы В.2

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|------------------------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | У: рис.1,б; $K_H=3$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$; $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,008$ $\tau_2=0,08$; $\tau_3=0,06$. | У: рис.1,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,006$; $\tau_2=0,09$; $\tau_3=0,1$. | У: рис.2,б; $K_H=3,1$. Ф: $K=1$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,1$; $\xi=0,7$. | У: рис.2,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,02$; $\tau_2=0,02$; $\xi=0,8$. | У: рис.1,б; $K_H=3,2$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,2$. |
| 7 | У: рис.2,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$; $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,003$; $\tau_2=0,02$; $\tau_3=0,02$. | У: рис.1,б; $K_H=2,4$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,3$; $\xi=0,85$. | У: рис.1,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,05$; $\tau_2=0,01$; $\xi=0,9$. | У: рис.2,б; $K_H=3,3$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,6$. | У: рис.2,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,75$. |
| 8 | У: рис.2,б $K_H=1,6$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,06$; $\xi=0,8$. | У: рис.2,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,056$; $\tau_2=0,02$; $\xi=0,75$. | У: рис.1,б; $K_H=3,4$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,7$. | У: рис.1,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=2$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,82$. | У: рис.2,б; $K_H=3,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,4$; $\tau_2=0,95$. |
| 9 | У: рис.1,а; $K_u=2$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,02$; $\tau_2=0,03$; $\xi=0,7$. | У: рис.2,б; $K_H=2,7$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,045$. | У: рис.2,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=0,5$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,078$. | У: рис.1,б; $K_H=3,6$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,98$; $\tau_2=0,089$. | У: рис.1,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,077$. |
| 0 | У: рис.1,б; $K_H=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,04$. | У: рис.1,а; $K_u=1,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,03$. | У: рис.2,б; $K_H=2,4$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,0009$. | У: рис.2,а; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$. | У: рис.1,б; $K_H=2,6$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$. ТЗ: № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,006$; $\tau_2=0,004$. |

Продолжение таблицы В.2

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра | | | | |
|---------------------------|---|--|--|---|--|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| 6 | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=2$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 2, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=5$. Ф: $K=2$. ТЗ: № 3, $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,005$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,003$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=3,1$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,007$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,008$; $\tau_2=0,002$; $\tau_3=0,005$. |
| 7 | У: рис.2, <i>б</i> $K_u=2,7$. Ф: $K=2$, $\alpha_1=0,5$. ТЗ: № 3, $\tau_1=2$; $\tau_2=0,004$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,009$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,8$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,001$; $\tau_2=0,02$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,2$; $\tau_2=0,001$; $\tau_3=0,001$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=4,9$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,02$; $\tau_2=0,07$; $\tau_3=0,002$. |
| 8 | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=1$. ТЗ: № 4, $k_1=2$; $\tau_1=0,001$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=3,2$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,04$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,007$; $\tau_2=0,005$; $\tau_3=0,001$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=6$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,04$; $\tau_3=0,06$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,008$; $\xi=0,65$. |
| 9 | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=2$. ТЗ: № 5, $k_1=2$; $\tau_1=0,004$; $\tau_2=0,002$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,008$; $\tau_2=0,002$; $\tau_3=0,006$. | У: рис.2, <i>б</i> ; $K_u=3,2$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,003$; $\tau_2=0,002$; $\tau_3=0,001$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,008$; $\xi=0,6$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=3,4$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,002$; $\tau_2=0,005$; $\xi=0,55$. |
| 0 | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=3$. ТЗ: № 6, $\tau_1=0,007$; $\tau_2=0,02$; $\tau_3=0,07$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 7, $\tau_1=0,02$; $\tau_2=0,05$; $\tau_3=0,005$. | У: рис.1, <i>а</i> ; $K_u=2$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 8, $k_1=2$; $\tau_1=0,007$; $\xi=0,45$. | У: рис.2, <i>а</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$, $\alpha_1=0,5$, $\alpha_2=-40$. ТЗ: № 9, $k_1=2$; $\tau_1=0,004$; $\tau_2=0,002$; $\xi=0,5$. | У: рис.1, <i>б</i> ; $K_u=2,5$. Ф: $K=1$. ТЗ: № 1, $k_1=2$; $\tau_1=0,001$. |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТАБЛИЦЕ В.2

$x(t)$ – входной сигнал;

УСИЛИТЕЛЬ:

У – усилитель;

рис. 1, а – схема усилителя на основе ОУ, приведенная в данном методическом указании, которая должна быть использована в расчете;

K_u, K_n – коэффициент усиления усилителя.

ФИЛЬТР:

Ф – фильтр нижних частот;

K – коэффициент усиления фильтра;

α_1 – максимально допустимое затухание в полосе пропускания, дБ;

α_2 – минимально допустимое затухание в полосе задерживания, дБ.

ТИПОВОЕ ЗВЕНО:

ТЗ – типовое звено;

№ 1 – номер схемы типового звена на ОУ (таблица 1), которая приведена в данном методическом указании и должна быть использована в расчете;

k_1 – коэффициент усиления типового звена;

τ_1, τ_2, τ_3 – постоянные времени типового звена, с;

ξ – коэффициент демпфирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Расчет динамических характеристик

$f := 0, 0.01..1000$

Значение частоты среза, Гц:

$f_c := 0.5$

Значения круговой частоты среза, рад/с:

$\omega_c := 2 \cdot \pi \cdot f_c$

$\omega_c = 3.142$

$\omega(f) := 2 \cdot \pi \cdot f$

$i := \sqrt{-1}$

Передаточная функция системы:

$$W(p) := \frac{25}{0.02p + 1}$$

АФХ системы:

$$W(f) := \frac{25}{0.02 \cdot i \cdot \omega(f) + 1}$$

Значения действительной и мнимой части:

$M(f) := \operatorname{Re}(W(f))$

$N(f) := \operatorname{Im}(W(f))$

Построение АЧХ

Модуль комплексного коэффициента преобразования:

$$\operatorname{MOD}W(f) := \sqrt{M(f)^2 + N(f)^2}$$

$$\operatorname{АЧХ}(f) := \operatorname{MOD}W(f)$$

$$\operatorname{АЧХ}(f) := |W(f)|$$

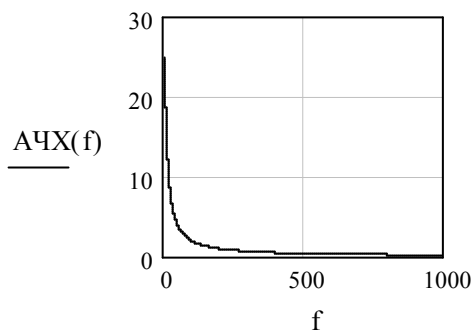


Рисунок Г.1 - АЧХ, полученная первым способом

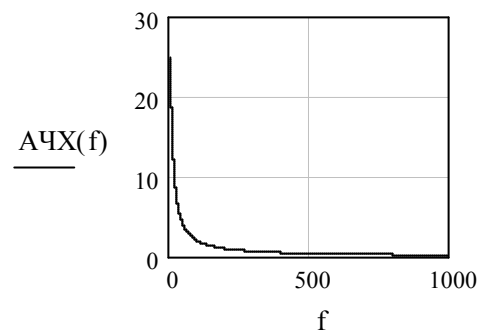


Рисунок Г.2 - АЧХ, построенная вторым способом

Построение ФЧХ

Аргумент комплексного коэффициента преобразования:

$$\Phi\operatorname{ЧХ}(f) := \operatorname{atan}\left(\frac{N(f)}{M(f)}\right)$$

$$\Phi\operatorname{ЧХ}(f) := \arg(W(f))$$

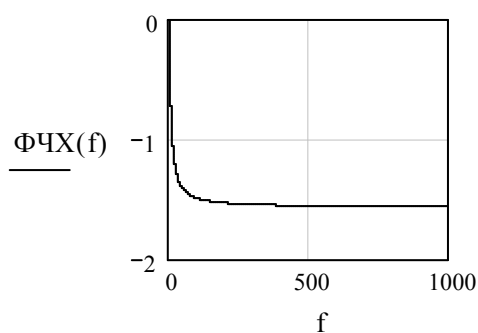


Рисунок Г.3 - ФЧХ, построенная первым способом

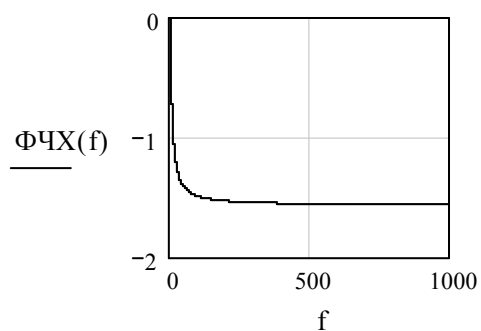


Рисунок Г.4 - ФЧХ, построенная вторым способом

Построение АФХ

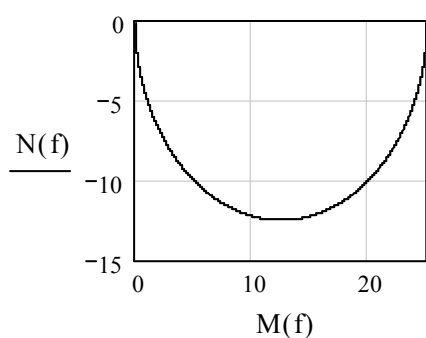


Рисунок Г.5 - АФХ, построенная первым способом

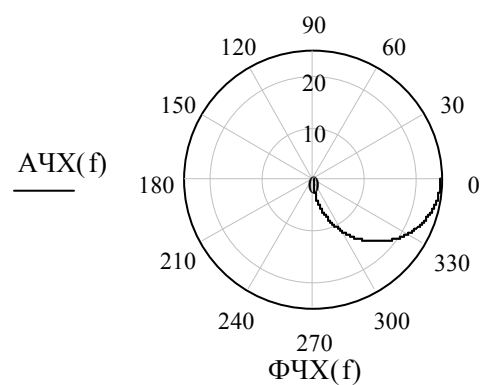


Рисунок Г.6 - АФХ, построенная вторым способом

Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ

$$\text{ЛАЧХ}(f) := 20\log(\text{АЧХ}(f))$$

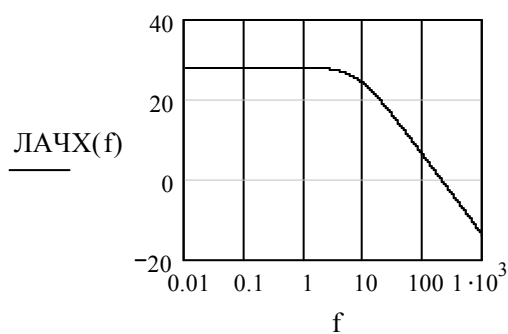


Рисунок Г.7 - ЛАЧХ

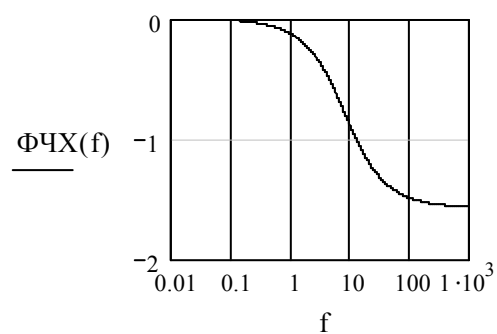


Рисунок Г.8 - ЛФЧХ