

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛОГОВЫХ ФИЛЬТРОВ

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков построения аналоговых фильтров.

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. построить АЧХ аналоговых фильтров с заданными параметрами: фильтр Баттерворта; фильтр Чебышева 1 рода; фильтр Чебышева 2 рода; эллиптический фильтр; фильтр Бесселя;
2. осуществить преобразование фильтров – прототипов (два вида преобразования).

Результатами работы являются:

- код программ;
- результаты выполнения программ – АЧХ;
- подготовленный отчет.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

1. Дифференциальное уравнение

Связь между входным и выходным сигналами линейной цепи с сосредоточенными параметрами может быть выражена в виде дифференциального уравнения (ДУ) вида

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + b_{m-2} \frac{d^{m-2} x}{dt^{m-2}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned}$$

Здесь $x(t)$ – входной сигнал, $y(t)$ – выходной сигнал, a_i и b_i – постоянные коэффициенты. Таким образом, цепь описывается наборами коэффициентов $\{a_i\}$ и $\{b_i\}$.

2. Функция передачи

Если применить к обеим частям приведенного в предыдущем разделе ДУ (2.8) преобразование Лапласа, получится выражение для операторного коэффициента передачи, или функции передачи цепи (transfer function):

$$H(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0}$$

Здесь a_i и b_i – те же постоянные коэффициенты, что и в приведенном ранее ДУ.

3. Нули и полюсы

Разложив числитель и знаменатель функции передачи (2.9) на множители, мы получим функцию передачи в следующем виде:

$$H(s) = k \frac{(s - z_m)(s - z_{m-1})(s - z_{m-2}) \dots (s - z_1)}{(s - p_n)(s - p_{n-1})(s - p_{n-2}) \dots (s - p_1)}$$

Здесь $k = b_m/a_n$ – коэффициент усиления (gain), z_i – нули функции передачи (zero), p_i – полюсы функции передачи (pole). В точках нулей $H(z_i) = 0$, а в точках полюсов $H(p_i) \rightarrow \infty$.

В данном случае цепь описывается набором параметров $\{z_i\}$, $\{p_i\}$, k .

4. Полюсы и вычеты

Еще одним способом преобразования дробно-рациональной функции передачи (2.9) является ее представление в виде суммы простых дробей. При отсутствии кратных корней у знаменателя такое представление имеет следующий вид:

$$H(s) = \frac{r_n}{s - p_n} + \frac{r_{n-1}}{s - p_{n-1}} + \frac{r_{n-2}}{s - p_{n-2}} + \dots + \frac{r_1}{s - p_1} + C_0$$

Здесь p_i – полюсы функции передачи, а числа r_i называются вычетами. C_0 – целая часть функции передачи, отличная от нуля только в случае равенства степеней полиномов числителя и знаменателя.

В данном случае цепь описывается набором параметров $\{r_i\}$, $\{p_i\}$, C_0 .

5. Пространство состояний

Еще одним способом описания линейной цепи является ее представление в пространстве состояний (state space). При этом состояние цепи описывается вектором состояния $s(t)$, а собственные колебания цепи и ее реакция на входной сигнал $x(t)$ характеризуются следующим образом:

$$\begin{aligned} s'(t) &= As(t) + B(x)t, \\ y(t) &= Cs(t) + Dx(t). \end{aligned}$$

Если размерность вектора состояния $s(t)$ равна N ($s(t)$ – вектор-столбец), а входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ сигналы являются скалярными, то размерность параметров в этих формулах будет следующей: A – матрица $N \times N$, B – столбец $N \times 1$, C – строка $1 \times N$, D – скаляр. Если входной и/или выходной сигналы являются векторными, размерность параметров соответствующим образом изменяется.

Описанием цепи в данном случае является набор параметров A , B , C , D .

АЧХ АНАЛОГОВОГО ФИЛЬТРА – FREQS

Фильтры, как и многие линейные цепи, описываются передаточными характеристиками в операторной форме следующего вида

$$H(s) = \frac{b_1 s^{nb} + b_2 s^{nb-1} + \dots + b_{nb+1}}{a_1 s^{na} + a_2 s^{na-1} + \dots + a_{na+1}}$$

Здесь na и nb – степени полиномов знаменателя и числителя, s – комплексная переменная. Функция `freqs` реализует расчет комплексных АЧХ в ряде вариантов:

- `h=freqs(b, a, w)` – по заданным в векторах a и b коэффициентам передаточной характеристики фильтра $H(s)$ вычисляет вектор h АЧХ аналогового фильтра, соответствующий вектору частот w ;

- `[h, w]=freqs(b, a)` – вычисляет векторы h АЧХ и частот w , автоматически определяя диапазон частот ее представления;

- `[h, w]=freqs(b, a[, n])` – вычисляет векторы h АЧХ и частот w для n точек АЧХ. Если n не задано, оно выбирается по умолчанию равным 200;

- `freqs(b, a)` – вычисляет АЧХ и выводит графики АЧХ и ФЧХ.

Для вывода АЧХ и ФЧХ для частот, выраженных в герцах, надо использовать следующие выражения: $f=w/(2*\pi)$.

Вычислим АЧХ и ФЧХ линейной системы второго порядка с передаточной характеристикой

$$H(s) = \frac{0.35s^2 + 0.5s + 1}{s^2 + 0.5s + 1}$$

$$a=[1 \ 0.5 \ 1]; b=[0.35 \ 0.5 \ 1];$$

$$h=freqs(b,a,w); mag=abs(h); phase=angle(h);$$

Здесь функция `freqs` задана с выходным параметром h . Поэтому она сама уже не строит графики АЧХ и ФЧХ, а лишь создает вектор комплексных значений АЧХ. Для построения графиков используются обычные графические команды MATLAB.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СПОСОБОВ ОПИСАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Формы описания цепей в именах функций обозначаются следующим образом:

- tf – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя функций передачи (transfer function);
- zp – нули и полюсы (zeros and poles);
- ss – описание в пространстве состояний (state-space).

Необходимость в преобразовании описаний часто возникает из-за того, что функции расчета цепей (такие как рассматриваемые далее функции расчета фильтров-прототипов) дают результат в одной форме, а функция, например, построения частотной характеристики требует задания входных параметров в другой форме.

Для входных и выходных параметров используются следующие обозначения:

функция передачи:

- b – вектор-строка коэффициентов (в порядке убывания степеней) числителя функции передачи;
- a – вектор-строка коэффициентов (в порядке убывания степеней) знаменателя функции передачи;

нули и полюсы:

- z – вектор нулей (столбец.);
- p – вектор полюсов (столбец);
- k – коэффициент усиления (скаляр);

пространство состояний:

- A – квадратная матрица связи вектора состояния и его производной;
- B – вектор-столбец связи входного сигнала и производной вектора состояния;
- C – вектор-строка связи выходного сигнала и вектора состояния;
- D – скалярный коэффициент связи выходного и входного сигналов.

Функция $tf2zp$

Функция $tf2zp$ преобразует наборы коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции передачи в векторы нулей и полюсов, рассчитывая также значение общего коэффициента усиления:

$$[z, p, k] = \text{tf2zp}(b, a);$$

Преобразование производится путем вычисления корней полиномов числителя и знаменателя функции передачи с помощью функции `roots`. Коэффициент усиления k рассчитывается как отношение $b(1)/a(1)$.

Функция `zp2tf`

Функция `zp2tf` является обратной по отношению к функции `tf2zp`: она осуществляет преобразование коэффициента усиления, а также векторов нулей и полюсов функции передачи в коэффициенты полиномов ее числителя и знаменателя:

$$[b, a] = \text{zp2tf}(z, p, k);$$

Функция `tf2ss`

Функция `tf2ss` преобразует наборы коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции передачи в параметры представления цепи в пространстве состояний:

$$[A, B, C, D] = \text{tf2ss}(b, a);$$

Функция `ss2tf`

Функция `ss2tf` является обратной по отношению к функции `tf2ss`: она преобразует параметры пространства состояний в коэффициенты полиномов функции передачи цепи:

$$[b, a] = \text{ss2tf}(A, B, C, D);$$

Функция `zp2ss`

Функция `zp2ss` преобразует нули, полюсы и коэффициент усиления цепи в ее параметры пространства состояний:

$$[A, B, C, D] = \text{zp2ss}(z, p, k);$$

Функция `ss2zp`

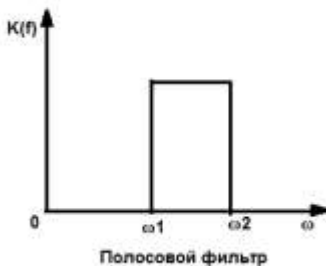
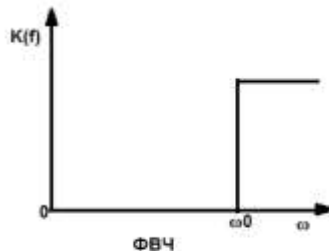
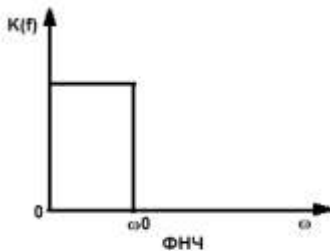
Функция `ss2zp` является обратной по отношению к функции `zp2ss`, преобразуя параметры пространства состояний в нули, полюсы и коэффициент усиления цепи:

$$[z, p, k] = \text{ss2zp}(A, B, C, D);$$

РАЗНОВИДНОСТИ ФИЛЬТРОВ

Фильтры необходимы для пропускания сигналов в определенной полосе частот и задерживающих остальные частоты. При этом различают:

- **фильтры нижних частот (ФНЧ)**, пропускающие частоты, меньшие некоторой частоты среза ω_0 ;
- **фильтры верхних частот (ФВЧ)**, пропускающие частоты, большие некоторой частоты среза ω_0 ;
- **полосовые фильтры (ПФ)**, пропускающие частоты в некотором диапазоне $\omega_1 \dots \omega_2$;
- **режекторные фильтры**, пропускающие на выход *все* частоты, кроме лежащих в некотором диапазоне $\omega_1 \dots \omega_2$.



Расчет аналогового фильтра начинается с расчета так называемого **фильтра-прототипа**, представляющего собой ФНЧ с частотой среза, равной 1 рад/с. Все функции MATLAB для расчета аналоговых прототипов возвращают векторы-столбцы нулей и полюсов функции передачи, а также значение коэффициента усиления. Частота среза для разных фильтров определяется по разному.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ-ПРОТОТИПОВ

Для преобразования фильтров-прототипов заданного вида с требуемыми частотами среза используются приведенные ниже четыре функции MATLAB. Принцип составления их имен следующий: сначала идет сокращение lp, означающее, что исходным фильтром является ФНЧ (low-pass), потом следует символ преобразования 2 и в конце стоит обозначение типа результирующего фильтра:

- lp2lp – изменение частоты среза ФНЧ (low-pass);
- lp2hp – преобразование ФНЧ в ФВЧ (high-pass);
- lp2bp – преобразование ФНЧ в полосовой фильтр (band-pass);
- lp2bs – преобразование ФНЧ в режекторный фильтр (band-stop).

Возвращаемый результат – пересчитанные параметры фильтра.

ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ СРЕЗА ФНЧ

Изменение частоты среза ФНЧ-прототипа сводится к простому масштабированию частотной оси и выполняется путем следующей замены переменной s в выражении для функции передачи:

$$s \rightarrow \frac{s}{\omega_0}$$

где ω_0 – требуемая частота среза ФНЧ. Такое преобразование производится функцией lp2lp:

$$[b1, a1] = \text{lp2lp}(b, a, w0)$$

$$[A1, B1, C1, D1] = \text{lp2lp}(A, B, C, D, w0)$$

Входными параметрами функции являются описание фильтра (в виде коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции передачи – b, a , или в пространстве состояний – A, B, C, D) и требуемая частота среза w_0 .

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФНЧ В ФВЧ

Преобразование ФНЧ-прототипа в ФВЧ требует инверсии частотной оси и выполняется путем следующей замены переменной s в выражении для функции передачи:

$$s \rightarrow \frac{s}{\omega_0}$$

где ω_0 - требуемая частота среза ФВЧ. Такое преобразование производится функцией lp2hp:

$$[b1, a1] = \text{lp2hp}(b, a, w0)$$

$$[A1, B1, C1, D1] = \text{lp2hp}(A, B, C, D, w0)$$

Входными параметрами функции являются описание фильтра (в виде коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции передачи – b, a или в пространстве состояний – A, B, C, D) и требуемая частота среза ω_0 .

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФНЧ В ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР

Преобразование ФНЧ-прототипа в полосовой фильтр требует более сложной трансформации частотной оси, чем в предыдущих случаях. Так, нулевая и бесконечная частоты должны преобразовываться в бесконечное значение на частотной оси ФНЧ-прототипа (там, где его коэффициент передачи стремится к нулю). Частоты, соответствующие краям требуемой полосы пропускания, должны после преобразования давать значения ± 1 , равные частоте среза ФНЧ-прототипа. Наконец, преобразование должно выполняться с помощью дробно-рациональной функции, чтобы сохранить дробнорациональную структуру функции передачи.

$$s \rightarrow Q \frac{(s/\omega_0)^2 + 1}{s/\omega_0}$$

Перечисленным требованиям удовлетворяет следующая замена переменной s :

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$$

где ω_1 и ω_2 - соответственно нижняя и верхняя границы полосы пропускания фильтра.

Такое преобразование выполняется функцией lp2bp:

$$[b1, a1] = \text{lp2bp}(b, a, w0, Bw)$$

$$[A1, B1, C1, D1] = \text{lp2bp}(A, B, C, D, w0, Bw)$$

Входными параметрами функции являются описание фильтра (в виде коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции

передачи – b , а или в пространстве состояний – A, B, C, D), средняя частота ω_0 и ширина $B\omega$ полосы пропускания фильтра (в радианах в секунду).

Внимание:

Обратите внимание на то, что средняя частота полосы пропускания – это среднее геометрическое, а не среднее арифметическое частот среза:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$

. Полоса пропускания рассчитывается без особенностей:

$$B_\omega = \omega_2 - \omega_1$$

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФНЧ В РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР

Для преобразования ФНЧ-прототипа в режекторный фильтр трансформация частотной оси должна быть обратной по отношению к предыдущему случаю. Нулевая и бесконечная частоты должны преобразовываться в нулевое значение на частотной оси ФНЧ-прототипа (там, где коэффициент передачи велик). Частоты, соответствующие краям требуемой полосы задерживания, должны после преобразования давать значения ± 1 , равные частоте среза ФНЧ-прототипа. Кроме того, некоторое значение частоты в полосе задерживания должно преобразовываться в бесконечность (там, где коэффициент передачи ФНЧ-прототипа стремится к нулю). Наконец, преобразование должно выполняться с помощью дробно-рациональной функции, чтобы сохранить дробно-рациональную структуру функции передачи.

$$s \rightarrow \frac{s/\omega_0}{Q((s/\omega_0)^2 + 1)}$$

Перечисленным требованиям удовлетворяет следующая замена переменной s :

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$$

Где ω_1 и ω_2 – соответственно нижняя и верхняя границы полосы задерживания фильтра.

Такое преобразование выполняется функцией `lp2bs`:

$$[b1, a1] = \text{lp2bs}(b, a, w0, Bw)$$

$$[A1, B1, C1, D1] = \text{lp2bs}(A, B, C, D, w0, Bw)$$

Входными параметрами функции являются описание фильтра (в виде коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции передачи – b, a или в пространстве состояний – A, B, C, D), средняя частота ω_0 и ширина Bw полосы задерживания фильтра (в радианах в секунду).

РАСЧЕТ АНАЛОГОВОГО ФИЛЬТРА

Для расчета аналогового фильтра необходимо выполнить две основные операции: рассчитать ФНЧ-прототип и преобразовать его к нужному типу фильтра с заданными частотами среза. Требуемая последовательность действий оформлена в виде следующих функций MATLAB:

- `butter(n, w0, type, 's')` – расчет фильтров Баттерворта;
- `cheby1(n, Rp, w0, type, 's')` – расчет фильтров Чебышева первого рода;
- `cheby2(n, Rs, w0, type, 's')` – расчет фильтров Чебышева второго рода;
- `ellip(n, Rp, Rs, w0, type, 's')` – расчет эллиптических фильтров;
- `besself(n, w0, type)` – расчет фильтров Бесселя.

Параметры n, Rp, Rs (их состав зависит от типа фильтра) – это параметры фильтра-прототипа: n – порядок фильтра, Rp – уровень пульсаций в полосе пропускания (в децибелах), Rs – уровень пульсаций в полосе задерживания (в децибелах).

Параметры $w0$ и `type` используются совместно для задания типа фильтра и значений его частот среза (в радианах в секунду):

- ФНЧ: $w0$ – скаляр, параметр `type` отсутствует;
- ФВЧ: $w0$ – скаляр, `type='high'`;

- полосовой фильтр: w_0 – двухэлементный вектор частот среза $[w_1 \ w_2]$, параметр `type` отсутствует;
- режекторный фильтр: w_0 – двухэлементный вектор частот среза $[w_1 \ w_2]$, `type='stop'`.

Таким образом, функции расчета фильтров требуют задания в качестве входных параметров порядка фильтра и его частоты среза. Однако исходными данными при разработке фильтров, как правило, являются другие параметры: частотные границы полос пропускания (ω_p) и задерживания (ω_s), а также допустимая неравномерность АЧХ в полосе пропускания (R_p) и минимально необходимое затухание в полосе задерживания (R_s). Поэтому необходимо произвести операцию выбора порядка фильтра.

Выбрать минимально необходимый порядок фильтра позволяют следующие однотипные функции пакета `Signal Processing`:

`[n, Wn] = buttord(Wp,Ws,Rp, Rs, 's')`

`[n, Wn] = cheb1ord (Wp, Ws,Rp, Rs, 's')`

`[n, Wn] = cheb2ord (Wp, Ws,Rp, Rs, 's')`

`[n, Wn] = ellipord (Wp,Ws,Rp, Rs, 's')`

Входной параметр R_p – допустимый уровень пульсаций в полосе пропускания (в децибелах), R_s – минимально необходимое затухание в полосе задерживания (в децибелах). Параметры W_p и W_s задают границы полос пропускания и задерживания, способ задания этих параметров зависит от типа проектируемого фильтра:

- ФНЧ: W_p и W_s – числа, при этом должно выполняться неравенство $W_p < W_s$;
- ФВЧ: W_p и W_s – числа, при этом должно выполняться неравенство $W_p > W_s$;
- полосовой фильтр: W_p и W_s – двухэлементные векторы, при этом должны выполняться неравенства $W_s(1) < W_p(1) < W_p(2) < W_s(2)$;
- режекторный фильтр: W_p и W_s – двухэлементные векторы, при этом должны выполняться неравенства $W_p(1) < W_s(1) < W_s(2) < W_p(2)$.

Выходными параметрами являются минимально необходимый для выполнения заданных требований порядок фильтра n и частота среза фильтра W_n . Эти параметры должны затем использоваться при вызове функции расчета фильтра. Возврат значения W_n избавляет

пользователя от забот, связанных с тем, что при расчете разных фильтров понятие частоты среза имеет разный смысл. Для эллиптических фильтров и фильтров Чебышева первого рода $W_n = W_p$, для фильтров Чебышева второго рода $W_n = W_s$, а для фильтров Баттерворта значение W_n (напомним, что оно определяет частоту среза по уровню 3 дБ) зависит от заданного уровня пульсаций.

В зависимости от того, сколько выходных параметров указано при вызове, функции могут возвращать результаты расчета в виде коэффициентов полиномов числителя и знаменателя функции передачи (два выходных параметра), нулей и полюсов (три выходных параметра) либо параметров пространства состояний (четыре выходных параметра):

$[b, a] = \dots$

$[z, p, k] = \dots$

$[A, B, C, D] = \dots$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 6 академических часа: 5 часов на выполнение и сдачу лабораторной работы и 1 час на подготовку отчета.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Задать параметры фильтров.
3. Построить АЧХ аналоговых фильтров с заданными параметрами: фильтр Баттерворта; фильтр Чебышева 1 рода; фильтр Чебышева 2 рода; эллиптический фильтр; фильтр Бесселя;
4. Выполнить преобразование фильтров – прототипов.
5. Оформить отчет.
6. Защитить выполненную работу у преподавателя.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Пример расчета полосового фильтра

Рассчитаем в качестве примера полосовой фильтр Чебышева первого рода 5-го порядка с полосой пропускания от 1 кГц до 9 кГц и уровнем пульсаций в полосе пропускания 3 дБ:

```

» [z, p, k] = cheb1ap(5, 3);    % ФНЧ-прототип
» [b, a] = zp2tf(z, p, k);     % функция передачи
» f1 = 1e3;                    % нижняя частота среза
» f2 = 9e3;                    % верхняя частота среза
» w0 = 2 * pi * sqrt(f1 * f2); % средняя частота
» Bw = 2 * pi * (f2 - f1);     % полоса пропускания
» [b, a] = lp2bp(b, a, w0, Bw); % полосовой фильтр
» f = 0:1:20e3;                % вектор частот для расчета
» h = freqs(b, a, 2*pi*f);     % частотная характеристика
» plot(f/1000, abs(h)),        % график АЧХ
    
```

ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№	n – порядок фильтра	R_p	R_s	Осуществить преобразование в фильтр
1	3	2	30	ФНЧ, полосовой
2	4	3	20	ФВЧ, режекторный
3	5	4	40	Полосовой, режекторный
4	2	5	45	ФВЧ, ФНЧ
5	6	6	25	ФНЧ, режекторный
6	3	4	35	ФВЧ, полосовой
7	4	5	65	ФНЧ, полосовой
8	5	6	15	ФВЧ, режекторный
9	2	2	10	Полосовой, режекторный
10	6	3	55	ФВЧ, ФНЧ
11	3	5	30	ФНЧ, режекторный
12	4	6	20	ФВЧ, полосовой
13	5	2	40	ФНЧ, полосовой

14	2	3	45	ФВЧ, режекторный
15	6	4	25	Полосовой, режекторный
16	3	6	35	ФВЧ, ФНЧ
17	4	2	65	ФНЧ, режекторный
18	5	3	15	ФВЧ, полосовой
19	2	4	10	ФНЧ, полосовой
20	6	5	55	ФВЧ, режекторный
21	3	2	30	Полосовой, режекторный
22	4	3	20	ФВЧ, ФНЧ
23	5	4	40	ФНЧ, режекторный
24	2	5	45	ФВЧ, полосовой
25	6	6	25	ФНЧ, полосовой
26	3	3	35	ФВЧ, режекторный
27	4	2	65	Полосовой, режекторный
28	5	6	15	ФВЧ, ФНЧ
29	2	5	10	ФНЧ, режекторный
30	6	4	55	ФВЧ, полосовой

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Укажите способы описания линейных систем.
2. Приведите классификацию аналоговых фильтров, используемых при проведении лабораторного исследования.
3. Раскройте методику построения аналоговых фильтров.
4. Опишите принцип действия фильтра нижних частот.
5. Укажите полосу пропускания фильтра верхних частот.
6. Сравните принцип действия полосового и режекторного фильтров.
7. Объясните АЧХ фильтров, реализованных в ходе выполнения лабораторных исследований.

ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- код программы согласно варианту;
- выводы.