

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

# ИССЛЕДОВАНИЕ LC-ФИЛЬТРОВ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторной работе  
для студентов

КУЙБЫШЕВ 1989

Составители: *М. Н. Пиганов, А. И. Колпаков*

УДК 621.372.54

*Исследование LC — фильтров /М. Н. Пиганов, А. И. Колпаков: Метод. указ.; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 15 с.*

Методические указания являются частью цикла лабораторных работ по курсу «Элементы комплексной микроминиатюризации». В них изложены основные понятия теоретических основ полосовых LC-фильтров и фазовых корректоров, используемых для улучшения их фазовых характеристик. Практическая часть работы направлена на освоение практических навыков определения амплитудно-частотных характеристик фильтров и умения обращаться со стендами, приборами, предназначенными для выполнения лабораторной работы и широко используемыми в радиоэлектронной промышленности.

Рецензент **В. В. Зайцев**

Цель работы — закрепление знаний по теории полосовых LC — фильтров и овладение практическими навыками работы со стендами и приборами, используемыми для исследования характеристик LC — фильтров.

### З а д а н и е

1. По конспекту лекций, рекомендованной литературе и данным методическим указаниям изучить теоретические основы полосовых LC — фильтров.

2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. Выполнить расчеты по определению порядка фильтра и его потерь.

4. Изучить порядок выполнения работы.

5. Снять амплитудно-частотную характеристику LC — фильтра и определить его параметры:  $f_0$ ,  $\Delta f$ ,  $f_{x1}$ ,  $f_{x2}$ ,  $\Delta A$ ,  $Q$ .

6. Настроить фазовый корректор и снять его амплитудно-частотную характеристику.

7. После анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) LC — фильтра и фазового корректора сделать вывод о целесообразности включения фазового корректора в схему LC — фильтра.

8. Исследовать изменение АЧХ ( $f_0$ ,  $\Delta f$ ) в диапазоне температур 24 ... 124°С.

Дать рекомендации по стабилизации величины  $f_0$  и улучшению тепловых характеристик с помощью фазовых корректоров.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛОСОВЫХ LC — ФИЛЬТРОВ

Применение LC — фильтров в радиоэлектронной аппаратуре обусловлено их уникальными свойствами: высокой стабильностью электрических характеристик, малой чувствительностью к разбросу параметров катушек индуктивности и конденсаторов, низким уровнем шумов и простотой реализации разнообразных амплитудно-частотных характеристик. К основным характеристикам полосовых LC — фильтров следует отнести следующие параметры (рис. 1):

1. Полоса пропускания частот от  $f_{-x}$  до  $f_x$ .

2. Неравномерность затухания фильтра в полосе пропускания  $\Delta A$ .

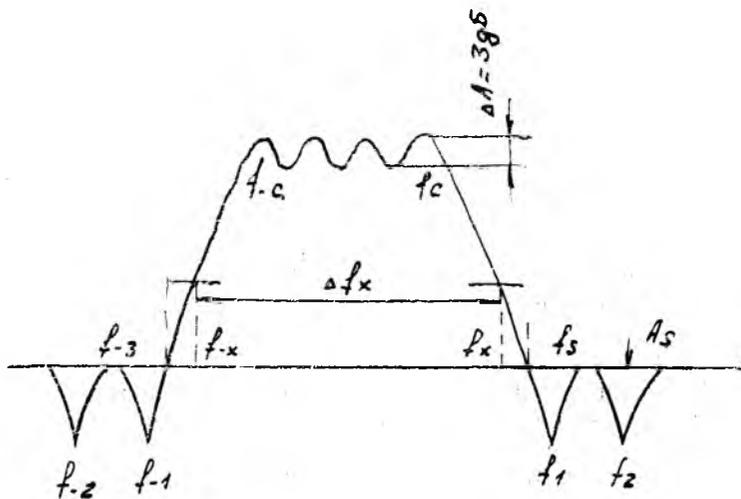


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра

3. Затухания на частотах  $f_{x1} = 1,046 f_x$  и  $f_{x2} = 1,12 f_x$  ( $A_s$ ).
4. Величина добротности на средней частоте фильтра  $f_0$ .
5. Затухание на частотах полосы пропускания фильтра (должно быть минимальным).
6. Величина нагрузочного сопротивления фильтра.

В радиоэлектронной аппаратуре используются катушки индуктивности, амплитудно-частотная характеристика добротности в полосе пропускания которых аппроксимируется линейной функцией вида  $Q = Q_0/f/f_0$  или функцией  $Q = Q_0$  (величина добротности катушек постоянна).

Величины индуктивности и емкости полосно-пропускающего фильтра определяют в два этапа. Вначале, пользуясь таблицами и значениями параметров  $\sigma$ ,  $\Delta A$ , определяют элементы фильтра низкой частоты, являющегося прототипом.

Схему фильтра прототипа выбирают, пользуясь данными рис. 2. Очевидно, что при четных значениях  $n$  можно пользоваться схемами рис. 2, а, б, а при нечетных — рис. 2, в, г.

В выбранную схему подставляют значения элементов, взятые из таблиц справочников. Прототип исследуемого в работе фильтра изображен на рис. 3. Для преобразования фильтра прототипа низкой частоты в ППФ воспользуемся формулами, приведенными в таблице.

В результате преобразования получается схема полосно-пропускающего фильтра, приведенная на рис. 4. Все контуры этого фильтра должны иметь на средней частоте добротность не ниже  $Q_0 =$

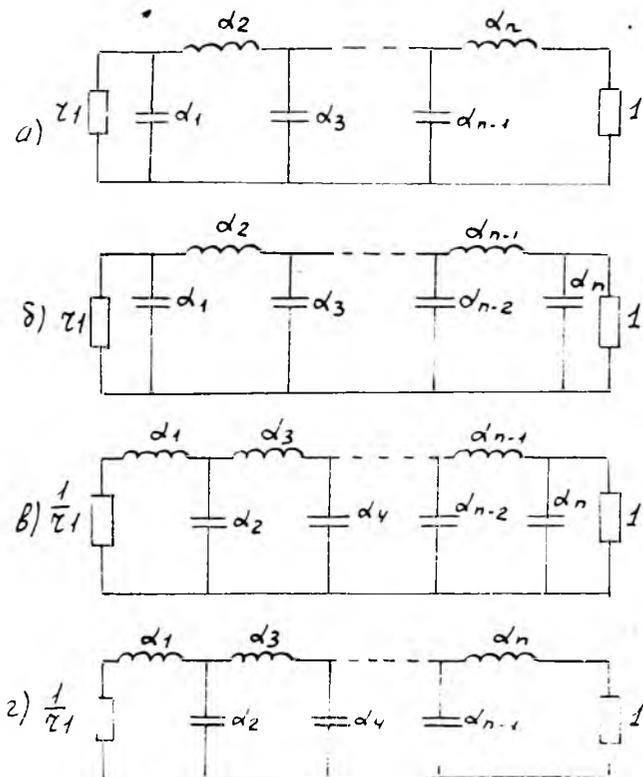


Рис. 2. Типы схем низкочастотного фильтра прототипа

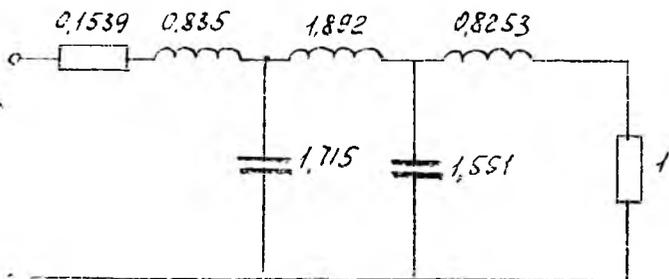


Рис. 3. Схема фильтра прототипа при следующих данных:  
 $f_{-c} = 3,5$  кГц,  $f_c = 4,3$  кГц,  $\Delta A = 0,02$  неп,  $f_{x1} = 4,5$  кГц,  
 $\Delta A_{x1} = 1,0$  неп,  $f_{x2} = 4,8$  кГц,  $\Delta A_{x2} = 4,0$  неп,  $r_1 = 1000$  Ом,  $f_0 =$   
 $= 3,880$  кГц,  $Q_n = 60$  дБ

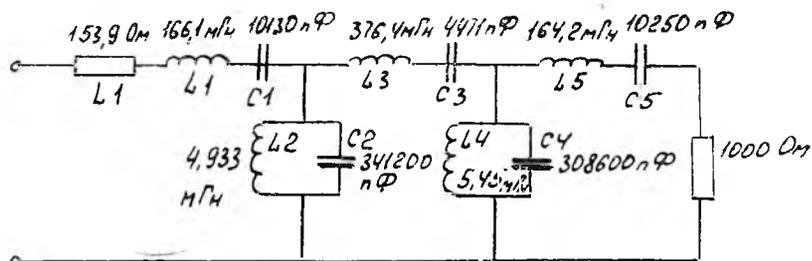


Рис. 4. Схема широкополосного полосно-пропускающего фильтра, рассчитанного по данным рис. 3

= 60,6 дБ. Его теоретическая частотная характеристика затухания изображена на рис. 5, где кружочками показаны результаты измерения рабочего затухания фильтра, изготовленного на катушках индуктивности с  $Q = Q_0 // \omega$ , а крестиками —  $Q = Q_0 = \text{const}$ . На

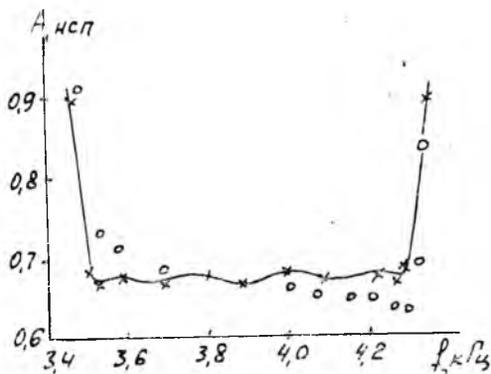


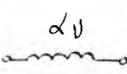
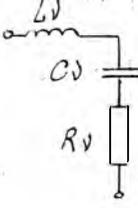
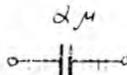
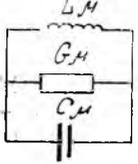
Рис. 5. Теоретическая амплитудно-частотная характеристика полосно-пропускающего фильтра

рис. 5 видно, что в полосе задержания оба фильтра ведут себя одинаково и дают затухания, почти совпадающие с теоретическими. В полосе пропускания фильтр на индуктивностях с  $Q = Q_0 = \text{const}$  дает значительно более приемлемую характеристику рабочего затухания. Индуктивности с характеристикой добротности  $Q = Q_0 // \omega$  без дополни-

тельных цепей коррекции не позволяют получить фильтр с характеристикой затухания, близкой к теоретической.

Полученным выводам можно дать физическое толкование. Будем считать, что потери в катушках индуктивности распределены согласно схемам, представленным в таблице. Тогда последовательно с каждым последовательным контуром LC и параллельно каждому параллельному контуру LC включаются постоянные активные сопротивления. Ввиду симметричности полных сопротивлений контуров фильтра его частотная характеристика затухания также должна быть симметричной. Если же постоянные сопротивления включены последовательно с индуктивностью (что имеет

Таблица перевода элементов фильтра прототипа  
в элементы полосового фильтра

Элемент прототипа	Перевод в элемент фильтра	Математическое описание схемы
		$L_V = \frac{\alpha V R_2}{\omega_c - \omega_c}, C_V = \frac{1}{\omega_c^2 L_V}$ $R_V = \alpha V \delta R_2$ $Q = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_c - \omega_c} \cdot \frac{\omega_0 L_V}{R_V}$ <p>при <math>\omega = \omega_0</math></p>
		$C_{\mu} = \frac{\alpha \mu}{(\omega_c - \omega_c) R_2}$ $L_{\mu} = \frac{1}{\omega_c^2 C_{\mu}}, R_{\mu} = \frac{\alpha \mu \delta}{R_2}$ $Q = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_c - \omega_c} \cdot \frac{1}{\omega_0 \mu G_{\mu}}$ <p>при <math>\omega = \omega_0</math></p>

место при  $Q = Q_0 // \omega_0$ , то в последовательных контурах требуемое распределение потерь соответствует расчетному, а в параллельных контурах эквивалентное сопротивление потерь, включаемое параллельно контуру, как это видно из рис. 6, меняется пропор-

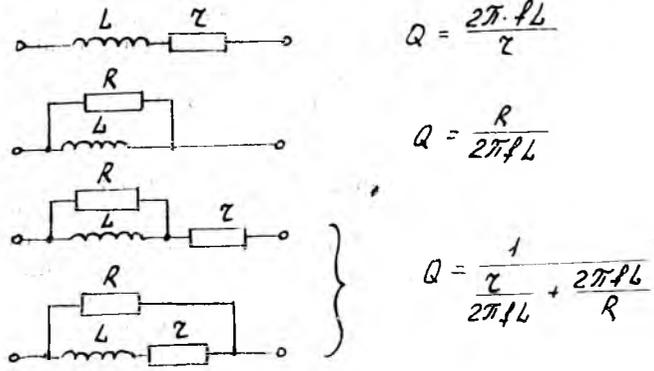


Рис. 6. Типовые схемы включения постоянных сопротивлений в последовательные и параллельные контуры

ционально квадрату частоты. В результате нарушается симметрия сопротивлений потерь в контурах фильтра, причем с повышением частоты активные сопротивления в последовательных ветвях схемы остаются постоянными, а в параллельных ветвях довольно существенно растут. Это приводит к уменьшению затухания фильтра с увеличением частоты. При плоской частотной характеристике добротности индуктивностей сопротивления потерь в последовательных  $Q_c$  и параллельных  $Q_p$  контурах возрастают пропорционально частоте, т. е.

$$Q_c = Q_0 (f/f_0)^{-1}, \quad (1)$$

$$Q_p = Q_0 (f/f_0). \quad (2)$$

В результате в определенном диапазоне частот характеристика затухания фильтра становится практически симметричной относительно его средней частоты.

### *ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРОВ*

Существует много вариантов выбора катушек индуктивностей. Если он специально не ограничен какими-то определенными соображениями, например, желанием применить имеющиеся в наличии типы катушек.

Применение ферромагнитных сердечников дает возможность получать катушки с большими индуктивностью и добротностью, чем у катушек с воздушными сердечниками при тех же частотах. Поэтому стремятся применять сердечники с большой магнитной проницаемостью и малыми потерями. Для получения сердечников с более стабильными характеристиками (малой зависимостью индуктивности от величины протекающего по ней тока, большего постоянства магнитной проницаемости и т. п.) в настоящее время изготавливают сердечники с зазором из пресс-порошков, обладающие малыми потерями. Сочетание большой магнитной проницаемости с малыми потерями обеспечивает получение высокой  $Q$ , а наличие зазора — стабильность ее величины.

Широко распространены сердечники из материалов: альсифер (на низких частотах) и оксифер (на высоких частотах). Альсифер — пресс-порошок из сплава алюминия, кремния и железа ( $\mu_0 = 60$ ). Наиболее распространены сердечники из альсифера марки ВЧК-22-36  $\times$  25  $\times$  0,38 (2 кольца), обладающие малыми потерями и малым коэффициентом нелинейных искажений, а также отрицательным температурным коэффициентом магнитной проницаемости.

Оксифер — пресс-порошок на основе сплава окислов железа с марганцем или никелем. Широко используются сердечники из марганцевого оксифера марки ОБ-20 С ( $\mu_0 = 2000$  и зазором 0,4 мм).

Самыми распространенными типами сердечников являются броневой и тороидальный. В броневых сердечниках индуктивность потока рассеяния наименьшая, и магнитные свойства материалов используются наилучшим образом. Наиболее широко используются броневые сердечники с внутренним зазором. Введение воздушного зазора стабилизирует характеристики сердечника. Тороидальные сердечники с зазором широкого применения не нашли.

Сердечники изготавливаются из разных материалов для различных частотных диапазонов и выпускаются подобранными парами с регулируемым воздушным зазором. Допуск на величину индуктивности различен и колеблется в пределах 1...3%. Настройка осуществляется путем введения в воздушный зазор подстроечного элемента, изменяющего величину индуктивности до 12%. На высоких частотах (50 мГц и более), когда величина емкости подстроечного конденсатора мала, необходимо принимать во внимание распределенную (межвитковую) емкость. Если диаметр провода выбирается для определенного каркаса катушки с сердечником  $14 \times 8$  мм, то межвитковая емкость составит 4...5 пФ для двухсекционного каркаса и 9...10 пФ для односекционного. Следует отметить, что при использовании двухсекционного каркаса одна половина витков наматывается в одной секции, а другая — в другой секции в том же самом направлении. При соответствующем выборе материала сердечник размером  $14 \times 8$  мм применяется на частотах до 10 кГц. С уменьшением частоты размеры сердечника растут, а с повышением (до нескольких мегагерц) уменьшаются.

Температурный коэффициент броневых сердечников находится в пределах  $(24 \dots 300) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ . Простота намотки, возможность регулировки частоты и низкий температурный коэффициент позволяют использовать такие сердечники в диапазоне частот от 10 кГц до нескольких мегагерц.

Тороидальные сердечники имеют, как правило, температурный коэффициент на порядок выше, чем чашеобразные. Этот тип сердечников применяется на частотах  $< 10$  кГц, так как обеспечивает получение более высокого значения индуктивности; температурный коэффициент на этих частотах не имеет большого значения.

Для получения максимальной добротности необходимо правильно выбрать соответствующий тип и диаметр провода. Одножильный эмалированный провод пригоден для использования на частотах порядка 100 кГц. На частотах  $> 100$  кГц повышение добротности обеспечивают применением многожильного провода, например, типа литценрат. Для броневых сердечников максимальная добротность получается при полном заполнении проводом каркаса катушки, достигаемом при правильном выборе диаметра сердечника. Процесс изменения числа витков является нежелательным, поэтому, чтобы не выйти за пределы диапазона изменения

индуктивности, необходимо использовать высокочастотные конденсаторы. В рассматриваемом диапазоне частот применяются слюдяные, полистироловые, керамические и стеклянные конденсаторы с низким температурным коэффициентом.

### ФАЗОВЫЕ КОРРЕКТОРЫ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Потери, возникающие в полосовом фильтре, вызывают фазовый сдвиг, что приводит к нелинейным искажениям. Нелинейность фазовых характеристик в полосе пропускания устраняется введением в схему фильтра корректирующих цепей, не вносящих дополнительных затуханий. На рис. 7 приведены типовые схемы фазовых корректоров.

Элементы фазовых корректоров можно рассчитать по следующим формулам:

$$L_1 = (R/2 ab) (b + a^2), M_1 = (R/2 ab) (b + a^2),$$

$$c_1 = 1/(2R \cdot a); c_2 = 2a/Rb;$$

$$L_1 = 2Ra/b, L_2 = R/2a, c_1 = (b + a^2)/2Rab, c_2 = a/Rb;$$

$$L_1 = 2Ra/b, L_2 = R/2a, c_2 = \frac{2a}{R(b - a^2)};$$

$$a = 4\pi f_{Re}, b = (2\pi f_{Re})^2 + (2\pi f_{Im})^2,$$

где  $f_{Re}$  и  $f_{Im}$  — вещественная и мнимая частоты звена соответственно.

Фазочастотная характеристика всепропускающего контура представляет собой S-образную кривую, которая асимптотична относительно нуля градусов при нулевой частоте и  $360^\circ$  при бесконечной частоте.

Самая большая крутизна фазовой кривой имеет место при  $180^\circ$ , что соответствует мнимой частоте цепи. Крутизна фазовой характеристики определяется отношением мнимой частоты к вещественной.

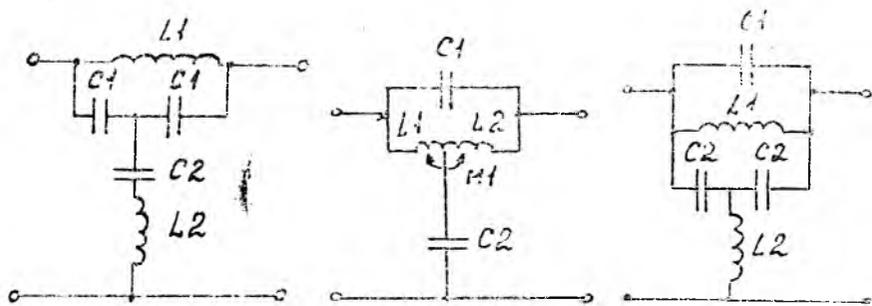


Рис. 7. Схемы всепропускающих фазовых корректоров

Фазу для любой частоты  $f_x$ , для любой из схем, представленных на рис. 7, можно вычислить по формуле

$$\varphi = 2 \left( \operatorname{arctg} \frac{f_x + f_{Im}}{f_{Re}} + \operatorname{arctg} \frac{f_x - f_{Im}}{f_{Re}} \right).$$

Расчет любого, даже самого простого фазового корректора без помощи ЭВМ — длительный и сложный процесс. Ограниченность объема методических указаний не позволяет привести его в более полном объеме.

### НАСТРОЙКА ФАЗОВЫХ КОРРЕКТОРОВ

На первом этапе настройки необходимо изолировать каждое звено от соседних звеньев, что устраняет необходимость применения фазометра. Настройка осуществляется с помощью схемы, показанной на рис. 8. Указанные на рис. 8 величины сопротивлений соответствуют сопротивлениям нагрузок 1000 Ом. Величина этих сопротивлений меняется с изменением сопротивлений нагрузок.

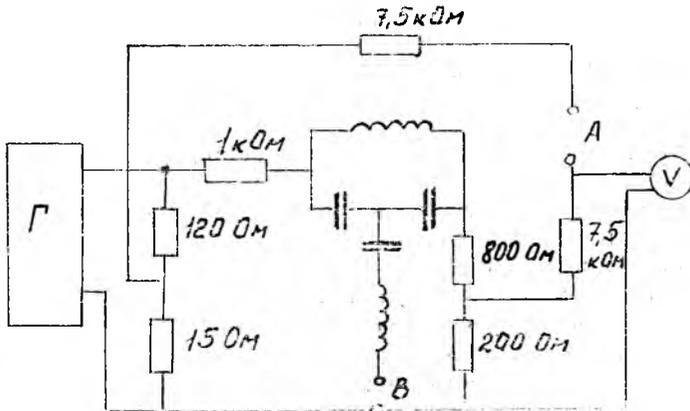


Рис. 8. Схема настройки фазового корректора

Верхняя часть схемы фазового корректора настраивается на вычисленную резонансную частоту параллельного контура по минимуму выходного сигнала вольтметра  $V$ . Затем замыкаются точки  $A$  и  $B$ , и нижняя часть схемы также настраивается по минимальному выходному сигналу, что получается тогда, когда оба напряжения сдвигаются по фазе на  $180^\circ$ . После индивидуальной настройки каждого из контуров фазового корректора их соединяют вместе. При равенстве сопротивлений нагрузки фазовый корректор конструктивно может быть выполнен как часть фильтра.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать экспериментальную установку согласно схеме рис. 9.



Рис. 9. Блок-схема измерения параметров полосового фильтра: 1—генератор синусоидальных колебаний типа ГЗ-102; 2—полосовой LC-фильтр; 3—вольтметр типа В7-22

2. Изучить принцип работы приборов, входящих в экспериментальную установку.

3. Снять амплитудно-частотную характеристику фильтра и определить: частоты среза  $f_{-c}$ ,  $f_c$ , полосу пропускания  $\Delta f$ , величину неравномерности затухания в полосе пропускания  $\Delta A$ .

4. По формулам

$$\Omega = \frac{f^2 - f_0^2}{f(f_c - f_{-c})}, f_0^2 = f_c f_{-c} = f_x f_{-x}$$

или

$$\Omega = \frac{f_x - f_{-x}}{\Delta f}, \text{ где } f_{-x} = \frac{f_c f_{-c}}{f}, \Delta f = f_c - f_{-c}$$

определить  $1/\Omega_{x1}$ ,  $A_{x1}$ ,  $1/\Omega_{x2}$ ,  $A_{x2}$ .

5. По кривым на рис. 10 определить порядок исследуемого фильтра.

6. Определить потери в контуре, используя выражение  $\sigma = f_0/\Delta f Q_0$ ,

где  $Q_0$ —средняя величина добротности контуров исследуемого фильтра, измеренных на частоте  $f_0$  каждого контура.

7. Определить характер изменения добротности катушек индуктивности фильтра ( $Q = Q_0 f/f_0$  или  $Q = Q_0$ ).

8. Настроить схему фазового корректора по схеме рис. 8.

9. Подключить фазовый корректор к схеме.

10. Снять зависимость параметров  $f_{-c}$ ,  $f_c$  от температуры (25... 124°C).

11. Осуществить коррекцию амплитудно-частотной характеристики фильтра с помощью схемы фазового корректора.

12. Выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные характеристики LC-фильтров.

2. Достоинства и недостатки LC-фильтров.

3. Перевести схему НЧ-фильтра прототипа, изображенного на рис. 3, в схему полосно-пропускающего фильтра.

4. Дать физическое объяснение характеру изменения АЧХ, изображенных на рис. 5.

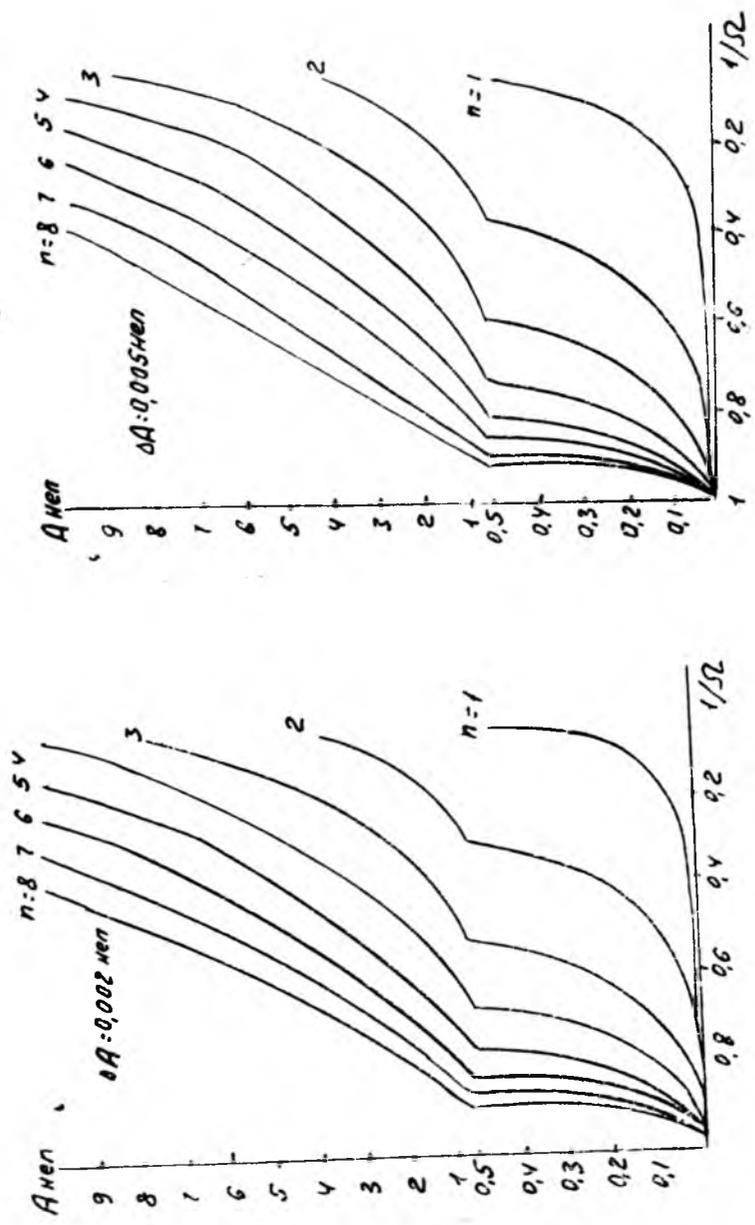


Рис. 10. Зависимости коэффициента затухания полюсно-пропускающего фильтра от обратной нормированной частоты (начало)

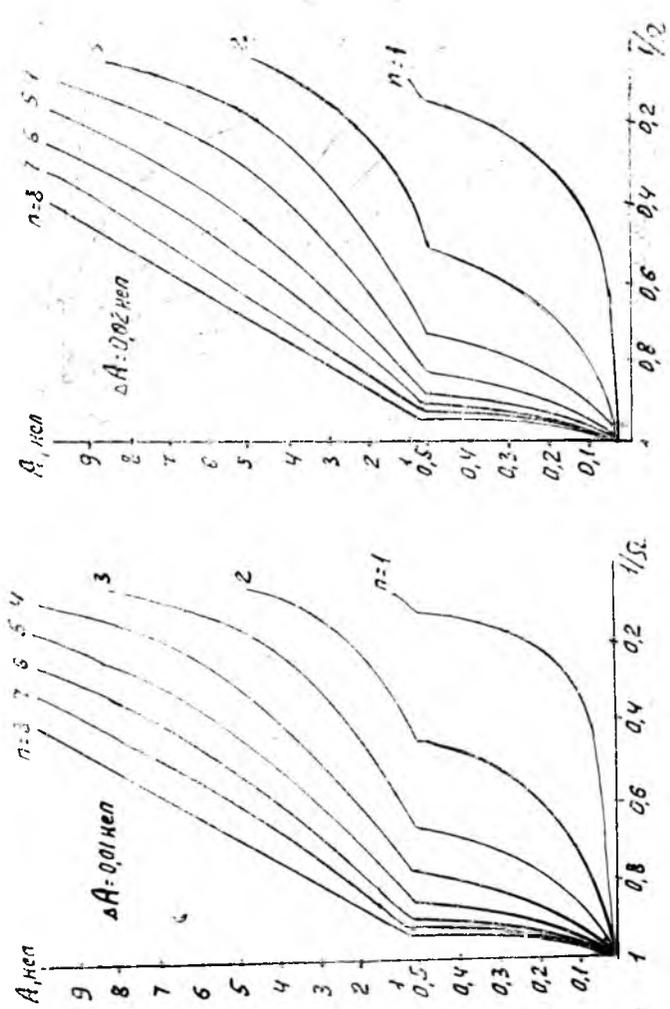


Рис. 10. Зависимости коэффициента затухания полностью-пропускающего фильтра от обдуг-ной нормированной частоты (продолжение)

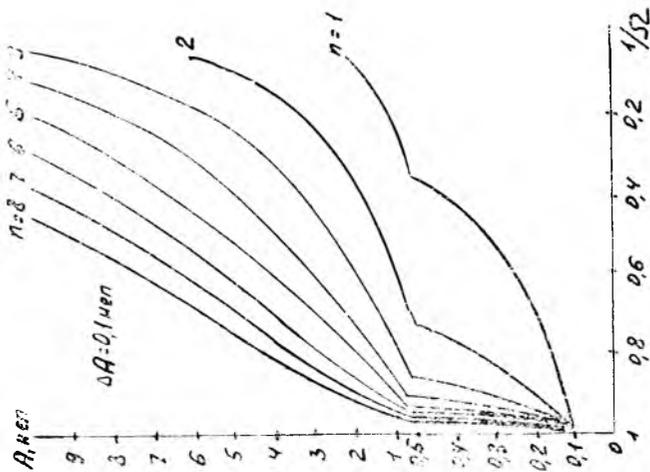
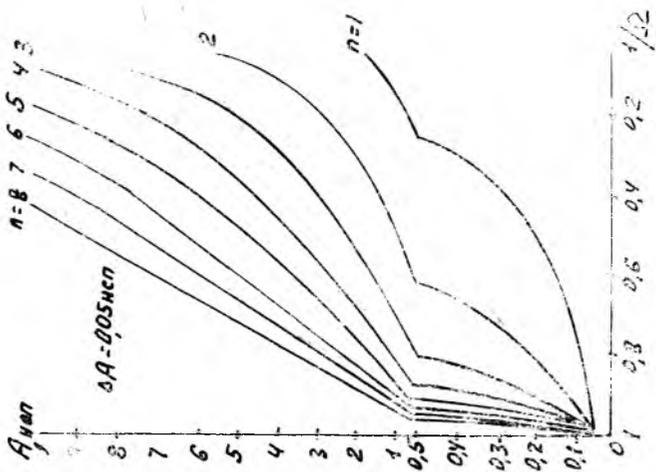


Рис. 10. Зависимости коэффициента затухания полосу-пропускающего фильтра от обратной нормированной частоты (продолжение)

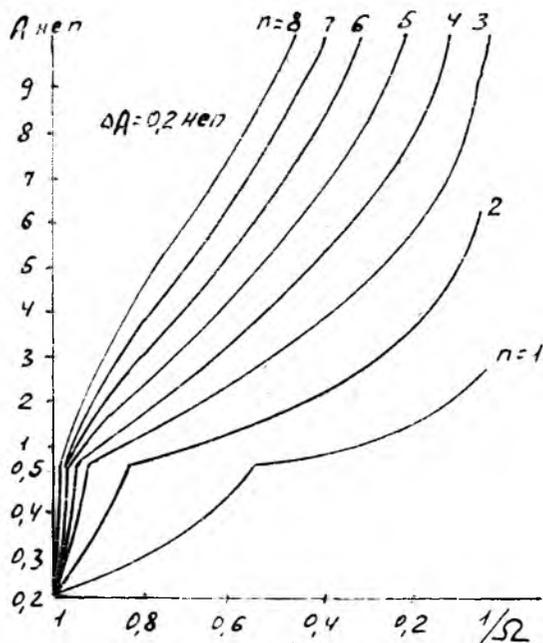


Рис. 10. Зависимости коэффициента затухания полосно-пропускающего фильтра от обратной нормированной частоты (окончание)

5. Критерии выбора элементов фильтра: магнитных сердечников, провода и каркаса.
6. Нелинейные искажения в LC-фильтрах и пути их устранения.
7. Схема настройки фазовых корректоров.
8. Схемы всепропускающих фазовых корректоров.
9. Типы включения постоянных сопротивлений в контуры фильтров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Басков Е. И., Лебедев А. Т. Оптимизация характеристик электрических фильтров на элементах с потерями. М.: Электросвязь, 1969. — 257 с.
2. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров. М.: Сов. радио, 1974. — 287 с.

Составители: *Михаил Николаевич Пиганов,*  
*Анатолий Иванович Колпаков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛС-ФИЛЬТРОВ

Редактор Е. Д. Антонова  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Подписано в печать 22.05.89 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.  
Печать высокая. Усл. п. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,93.  
Т. 300 экз. Заказ 396. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева  
443001 Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,  
443001, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18