

БИБЛИОТЕКА ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

О

Выпуск 6

И. С. КИСЛЯКОВ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА

1967

ЛЕНИНГРАД

В книге изложен метод расчета электрических фильтров, составленных из катушек индуктивности и конденсаторов. Приводятся расчетные соотношения, графики и таблицы, необходимые для определения оптимальных характеристических параметров фильтров.

Книга рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников.

Кисляков Иосиф Семенович. Расчет электрических фильтров (Библиотека по радиоэлектронике, вып. 6). М. — Л., изд-во „Энергия“, 1967, 80 стр. с илл.

3-4-1

299-67

Редактор *В. Н. Шахгеданов*

Техн. редактор *В. В. Зеркаленкова*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 30/IX 1966 г.

Подписано в печать 9/XII 1966 г.

Бумага типографская мелованная 84×108¹/₃₂

Физ. печ. л. 2,5

Усл. печ. л. 4,2

Уч.-изд. л. 3,92

T-16812

Тираж 12 000 экз.

Цена 21 коп.

Зак. 2644

Издательство „Энергия“, Москва, Ж-114,

Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	4
Глава первая. <i>Элементы теории четырехполюсников</i> .	8
1. Понятие о характеристических параметрах	8
2. Характеристические и рабочие параметры фильтров	12
3. Единицы измерения затухания	15
Глава вторая. <i>Фильтры нижних частот</i>	16
4. Элементарный фильтр нижних частот	16
5. Классы фильтров нижних частот по сопротивлению и затуханию	23
Глава третья. <i>Расчет оптимальных характеристических параметров фильтров нижних частот</i>	24
6. Оптимальные параметры фильтров	24
7. Выбор класса фильтра по сопротивлению	25
8. Определение класса фильтра по затуханию	27
9. Расчет элементов схемы фильтров	29
Глава четвертая. <i>Преобразование частоты</i>	31
10. Расчет фильтров с помощью фильтра-прототипа .	31
Глава пятая. <i>Фильтры с потерями</i>	33
11. Влияние потерь на характеристики фильтров . .	33
Глава шестая. <i>Примеры расчета фильтров</i>	39
12. Расчет фильтра нижних частот	39
13. Расчет фильтра верхних частот	43
14. Расчет полосового фильтра	47
Литература	54
Таблицы для расчетов	55

ВВЕДЕНИЕ

В аппаратуре автоматики и связи для выделения полезного сигнала из сложного комплекса электрических колебаний используются устройства, называемые электрическими фильтрами.

Область (области) частот, в которой сигнал проходит через фильтр с небольшим затуханием, называют полосой (полосами) пропускания фильтра; область (области), в которой сигнал проходит через фильтр с достаточно большим затуханием, называют полосой (полосами) задерживания фильтра.

По характеру расположения полос пропускания и задерживания на оси частот различают: *фильтры нижних частот* (ФНЧ), *фильтры верхних частот* (ФВЧ), *полосовые фильтры* (ПФ), *заграждающие фильтры* (ЗФ).

На рис. 1 приведены типовые соотношения характеристик фильтров указанных наименований.

В фильтре нижних частот полоса пропускания располагается от 0 до частоты f_{e1} ; полоса задерживания начинается от частоты f_e и продолжается до бесконечно больших частот. Между граничными частотами f_{e1} и f_e располагается область частот, называемая часто переходной, где никаких особых требований к характеристике фильтра не предъявляется.

Для фильтра верхних частот граничные частоты полосы пропускания и задерживания обозначаются f_{a1} и f_a соответственно.

В полосовом и заграждающем фильтрах имеются по две граничные частоты: f_{a1} и f_{e1} — граничные частоты полосы пропускания и f_a и f_e — граничные частоты полосы задерживания.

Изобретение фильтра относится к 1915 г. В этом году были опубликованы первые работы, в которых исследовались фильтрующие свойства простейших электриче-

ских схем, составленных из катушек индуктивности и конденсаторов, и предлагался метод расчета таких схем при условии идеального согласования их с нагрузочными сопротивлениями. Требуемую избирательность получали путем соответствующего подбора и каскадного соединения элементарных фильтрующих звеньев.

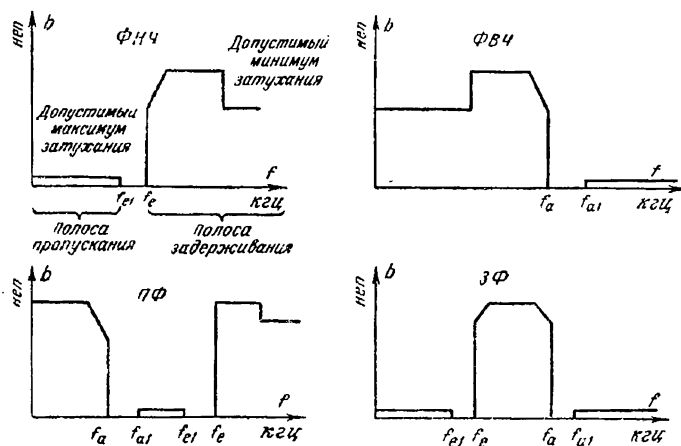


Рис. 1. Типовые требования к затуханию фильтров.

С развитием техники связи возрастала роль электрических фильтров, повышались требования к их частотным характеристикам и совершенствовались методы расчета.

Важным этапом в развитии теории электрических фильтров явились работы немецкого исследователя Вильгельма Кауэра. Заслуга В. Кауэра в том, что он впервые применил в задачах синтеза фильтров теорию наилучшего приближения функций, разработанную великим русским ученым П. Л. Чебышевым. Применение методов теории наилучшего приближения функций позволяет проектировать фильтры, имеющие оптимальные параметры, т. е. параметры, которые при данном числе фильтрующих элементов обеспечивают наилучшие частотные характеристики.

Ценный вклад в теорию электрических фильтров внесли советские ученые В. Н. Листов, С. С. Коган, А. Ф. Белецкий. В своих работах Коган [Л. 1] и Белецкий [Л. 2] развили идеи, заложенные Кауэром, и внесли

ряд новых важных положений в теорию электрических фильтров.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом ведутся работы по дальнейшему развитию теории и методов расчета электрических фильтров. Внимание исследователей привлекают как специальные фильтры (например, электромеханические, кварцевые, пассивные и активные RC -фильтры), так и фильтры, составленные из катушек индуктивности и конденсаторов.

Современная теория фильтров предоставляет довольно широкий выбор методологически различных способов реализации заданной частотной характеристики. Так, например, в зависимости от того, какие характеристики фильтра при проектировании принимаются за исходные, различают расчеты по рабочим и характеристическим параметрам. Каждый из указанных методов позволяет отдельные этапы расчета производить различными способами: графически (с помощью шаблонов, графиков, номограмм), аналитически (по формулам), либо пользуясь табличными данными. Невозможно дать сколько-нибудь исчерпывающие рекомендации, каким именно методом проектирования фильтров следует пользоваться в том или ином случае; выбор метода должен определяться, с одной стороны, опытом и навыками разработчика, а с другой — конкретной задачей, которую разработчику предстоит решать. Однако могут иметь место некоторые соображения общего порядка.

Известно, что расчет фильтров по рабочим параметрам [Л. 2] позволяет получать электрические схемы, содержащие количество элементов (катушек индуктивности и конденсаторов), минимально необходимое для реализации заданной частотной характеристики. При расчете фильтров по характеристическим параметрам [Л. 1 и 2] количество элементов в схеме в общем случае будет несколько больше минимально необходимого. Однако имеющаяся здесь некоторая «избыточность» элементов приводит к тому, что чувствительность частотных характеристик фильтра к отклонениям значений элементов от расчетных будет меньше, чем для случая схем, рассчитанных по рабочим параметрам. Поэтому схемы, полученные в результате расчета по характеристическим параметрам, позволяют использовать менее точные (имеющие больший допуск) и, следовательно, более дешевые элементы.

Расчет фильтров по рабочим параметрам требует от разработчика специальной подготовки и связан с весьма трудоемкими вычислениями. В последние годы за рубежом и в нашей стране изданы справочные таблицы [Л. 3], включающие значения элементов схем, рассчитанных по рабочим параметрам, для некоторых классов фильтров. Однако практическая ценность указанных таблиц снижается тем, что в них никак не учитывается наличие потерь в реальных элементах фильтра, которые соответственно влияют на частотные характеристики его, особенно в полосе пропускания.

По изложенным причинам расчет фильтров по рабочим параметрам обычно применяют, когда необходимо достичь минимального числа элементов (минимальных габаритов) либо для решения специальных задач. В тех случаях, когда к фильтру предъявляются типовые требования, следует рекомендовать расчет по характеристическим параметрам, который достаточно прост и не требует специальной подготовки.

В настоящей работе излагается метод расчета оптимальных характеристических параметров фильтров. В основу излагаемого метода положена работа С. С. Когана [Л. 1].

При расчете электрических фильтров приходится иметь дело с достаточно трудоемкими вычислениями, поэтому в настоящую книгу включены таблицы и графики, которые в значительной мере упрощают эту работу. Так, например, с помощью кривых, представленных на рис. 16—19, может быть легко учтено влияние потерь в элементах на величину собственного затухания фильтра в полосе пропускания. Точность оценки при этом, как показывает опыт, оказывается вполне удовлетворительной. В табл. 2-9 приведены оптимальные значения параметра m и нормированных частот бесконечного затухания, вычисленные с помощью электронно-вычислительной машины.

В работу включены некоторые сведения из теории четырехполюсников, знание которых необходимо при проектировании фильтров.

Приводятся примеры расчета фильтров.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

1. ПОНЯТИЕ О ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Под четырехполюсником понимают электрическую схему, имеющую две пары зажимов: входную, к которой подключается источник энергии, и выходную к которой подключается приемник (нагрузка).

Четырехполюсники, не содержащие источников энергии, называют пассивными.

Реактивными называют четырехполюсники, составленные из реактивных элементов, например катушек индуктивности и конденсаторов. Так как реальные катушки индуктивности и конденсаторы всегда имеют конечную добротность и, следовательно, не являются идеальными реактивными элементами, то, очевидно, существование идеальных реактивных четырехполюсников также невозможно. Однако условная идеализация реактивных



Рис. 2. Четырехполюсник.

четырёхполюсников оказывается весьма полезной, ибо при этом существенно упрощается анализ схем и представляется возможным выявить важные свойства их.

На рис. 2 в виде прямоугольника изображен пассивный четырехполюсник; U_1 и I_1 — напряжение и ток на входе четырехполюсника; U_2 и I_2 — напряжение и ток на выходе четырехполюсника. Передающие свойства четырехполюсника будут определены, если будут установлены соотношения между токами и напряжениями, действующими со стороны его входных и выходных зажимов.

мов. Так, например, записав систему уравнений в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= a_{11}\dot{U}_2 + a_{12}i_2; \\ i_1 &= a_{21}\dot{U}_2 + a_{22}i_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

можно полностью определить характеристики четырехполюсника, если известны параметры a .

Решив систему уравнений (1) относительно любой пары, составленной из величин \dot{U}_1 , i_1 и \dot{U}_2 , i_2 , можно получить шесть различных систем, составленных из двух уравнений; при этом каждая система будет характеризоваться своими параметрами.

С точки зрения описания свойств четырехполюсников все системы параметров равнозначны и выбор той или иной из них определяется вопросами удобства в каждом конкретном случае.

Для анализа реактивных четырехполюсников широкое распространение получила система так называемых характеристических, или собственных, параметров.

Характеристические параметры четырехполюсника составляют характеристические сопротивления со стороны его входных и выходных зажимов, обозначаемые соответственно Z_{c1} и Z_{c2} , и характеристическая постоянная передачи g_c .

Под характеристическим сопротивлением четырехполюсника Z_{c1} со стороны зажимов $1-1'$ понимают сопротивление, определяемое выражением

$$Z_{c1} = \sqrt{Z_{K,31}Z_{X,p1}}; \quad (2)$$

аналогично

$$Z_{c2} = \sqrt{Z_{K,32}Z_{X,p2}}, \quad (3)$$

где $Z_{K,31}$ ($Z_{K,32}$) — входное сопротивление четырехполюсника, замеренное со стороны зажимов $1-1'$ ($2-2'$) при замкнутых накоротко зажимах $2-2'$ ($1-1'$);

$Z_{X,p1}$ ($Z_{X,p2}$) — входное сопротивление четырехполюсника, замеренное со стороны зажимов $1-1'$ ($2-2'$) при разомкнутых зажимах $2-2'$ ($1-1'$).

Четырехполюсники, для которых справедливо равенство

$$Z_{c1} = Z_{c2},$$

называют симметричными.

Антиметричными называют четырехполюсники, у которых характеристические сопротивления связаны соотношением

$$Z_{c1}Z_{c2} = R_0^2,$$

где R_0 — постоянное сопротивление.

Из уравнений (1) может быть получено выражение для входного сопротивления четырехполюсника $Z_{вх1}$ со стороны зажимов 1-1':

$$Z_{вх1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{a_{11} \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} + a_{12}}{a_{21} \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} + a_{22}}. \quad (4)$$

На основании (1) и (2) имеем:

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{a_{11}a_{12}}{a_{21}a_{22}}}. \quad (5)$$

Аналогично может быть получено выражение

$$Z_{c2} = \sqrt{\frac{a_{12}a_{22}}{a_{11}a_{21}}}. \quad (6)$$

Отметим, что в выражении (4) отношение \dot{U}_2/\dot{I}_2 представляет собой сопротивление нагрузки, подключенное к зажимам четырехполюсника 2-2'. Если положить сопротивление нагрузки равным Z_{c2} , то, решив совместно уравнения (4) и (6) с учетом (5), получим:

$$Z_{вх1} = Z_{c1}. \quad (7)$$

Аналогично для входного сопротивления четырехполюсника со стороны зажимов 2-2' при условии, что к зажимам 1-1' подключено нагрузочное сопротивление, равное Z_{c1} , можно получить:

$$Z_{вх2} = Z_{c2}. \quad (8)$$

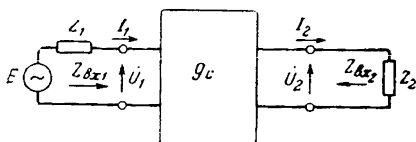


Рис. 3. Четырехполюсник, включенный между генератором и нагрузкой.

На рис. 3 представлен четырехполюсник, включенный между источником э. д. с. \dot{E} с внутренним сопротивлением Z_1 и нагрузочным сопротивлением Z_2 . Если сопро-

тивления Z_1 и Z_2 выбраны из условий $Z_1 = Z_{c1}$ и $Z_2 = Z_{c2}$, то обеспечиваются равенства (7) и (8). Такое включение четырехполюсника, когда он с каждой стороны нагружен на сопротивление, равное его входному сопротивлению, называют согласованным.

Теперь можно дать определение другого характеристического параметра — характеристической постоянной

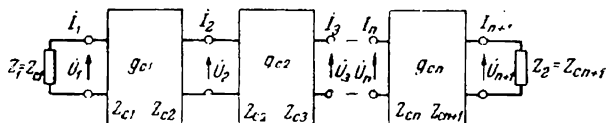


Рис. 4. Каскадное соединение четырехполюсников.

передачи g_c : это параметр, определяемый сравнением произведений комплексов напряжений и токов на входе и выходе четырехполюсника при условии согласованного включения:

$$g_c = b_c + ja_c = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \dot{I}_2}. \quad (9)$$

Вещественную часть характеристической постоянной передачи

$$b_c = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\dot{U}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \dot{I}_2} \right|$$

называют характеристическим (или собственным) затуханием. Коэффициент при мнимой части g_c

$$a_c = \frac{1}{2} \arg \left(\frac{\dot{U}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \dot{I}_2} \right)$$

называют характеристической фазовой постоянной.

В общем случае четырехполюсники характеризуются двумя характеристическими постоянными передачи: при передаче энергии в направлении от зажимов 1-1' к зажимам 2-2' — величиной g_{c1} , а при передаче энергии в обратном направлении — величиной g_{c2} . Однако в пассивных четырехполюсниках постоянная передачи не зависит от направления передачи энергии (четыреполюсники обратимы), т. е. $g_{c1} = g_{c2} = g_c$.

На рис. 4 представлено каскадное соединение, составленное из n согласованных четырехполюсников. На основании выражения (9) можно записать:

$$\begin{aligned} g_{c1} + g_{c2} + \dots + g_{cn} &= \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 i_1}{\dot{U}_2 i_2} + \\ &+ \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_2 i_2}{\dot{U}_3 i_3} + \dots + \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_n i_n}{\dot{U}_{n+1} i_{n+1}} = \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 i_1}{\dot{U}_{n+1} i_{n+1}} = g_c, \end{aligned}$$

т. е. характеристическая постоянная передачи g_c сложного четырехполюсника, составленного из n каскадно включенных согласованных четырехполюсников, равна сумме характеристических постоянных передачи составляющих четырехполюсников.

2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ И РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРОВ

Из выражений (1) и (9), учитывая известные соотношения для гиперболических функций, может быть получено равенство

$$\operatorname{th} g_c = \operatorname{th} (b_c + ja_c) = \sqrt{\frac{Z_{к.з1}}{Z_{х.р1}}}. \quad (10)$$

Для реактивных четырехполюсников сопротивления холостого хода и короткого замыкания представляют собой сопротивления реактивных двухполюсников и, следовательно, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} Z_{к.з1} &= jX_1; \\ Z_{х.р1} &= jX_2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где X_1 и X_2 — некоторые вещественные функции частоты, определяемые схемой и значениями элементов указанных двухполюсников

Из выражений (10) и (11) видно, что для диапазона (диапазонов) частот, где функции X_1 и X_2 имеют разные знаки, выражение для $\operatorname{th} g_c$ становится чисто мнимым:

$$\operatorname{th} g_c = j \sqrt{\frac{X_1}{X_2}}$$

и, следовательно, собственное затухание четырехполюсников

$$b_c = 0.$$

На частотах, где функции X_1 и X_2 имеют одинаковый знак, $b_c \neq 0$. Очевидно, что реактивные четырехполюсники, собственное затухание которых в одной полосе частот отлично от нуля, а в другой полосе равно нулю, будут обладать определенными избирательными свойствами. Такие четырехполюсники называют реактивными фильтрами.

Полосу (полосы) частот, в которой собственное затухание равно нулю, называют характеристической полосой (полосами) пропускания; соответственно полосу (полосы) частот, где собственное затухание не равно нулю, называют характеристической полосой (полосами) задерживания фильтра. Граничные частоты, разделяющие характеристические полосы пропускания и задерживания, называют частотами среза фильтра.

Из выражений (2), (3) и (10) видно, что характеристическое сопротивление фильтра в полосе задерживания мнимо, а в полосе пропускания вещественно и зависит от частоты. В реальных условиях фильтр обычно оказывается включенным между источником электрических колебаний с активным внутренним сопротивлением R_1 и активным нагрузочным сопротивлением R_2 . Тем самым исключается возможность согласовать фильтр во всей полосе частот.

Вследствие несогласованности фильтра с нагрузочным сопротивлением параметры фильтра, измеренные с учетом реальных нагрузок, будут отличаться от характеристических. Такие параметры называют рабочими. Примером рабочего параметра является входное сопротивление фильтра, измеренное при подключенной к его входным зажимам нагрузке. Важными рабочими параметрами фильтра являются рабочее затухание b_p и затухание эхо b_n .

Если генератор с внутренним сопротивлением R_1 замкнуть на сопротивление R_2 (рис. 5), то мощность, рассеиваемая на нагрузке R_2 , определится по формуле

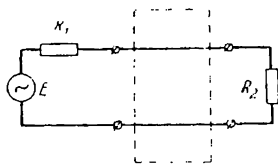


Рис. 5. Генератор с внутренним сопротивлением R_1 нагружен на сопротивление R_2 .

$$P = \frac{|\dot{E}|^2}{(R_1 + R_2)^2} R_2. \quad (12)$$

Для заданных значений E и R_1 выражение (12) имеет максимум при $R_2=R_1$, и следовательно, наибольшая мощность, которая может поступить в нагрузку, равна:

$$P_0 = \frac{|\dot{E}|^2}{4R_1}.$$

Если между генератором и нагрузкой включить фильтр, то мощность, поступающая на вход фильтра, $P_{вх}$ будет отличаться от максимальной на величину $P_в$, определяемую несогласованностью внутреннего сопротивления с входным сопротивлением фильтра. Часть мощности $P_{вх}$ будет рассеиваться в схеме фильтра, а часть ее P_2 поступит на нагрузку.

Полагая, что фильтр составлен из идеальных реактивных элементов и, следовательно, $P_{вх}=P_2$, можно записать:

$$P_0 = P_2 + P_в. \quad (13)$$

Если обозначить через

$$b_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_0}{P_2} \quad (14)$$

рабочее затухание и через

$$b_в = \frac{1}{2} \ln \frac{P_0}{P_в} \quad (15)$$

затухание эхо, то, решив совместно (13), (14) и (15), получим важное выражение, определяющее передающие свойства реактивных четырехполюсников, включенных между активными сопротивлениями:

$$e^{-2b_p} + e^{-2b_в} = 1. \quad (16)$$

В ряде задач, связанных с применением фильтров, может иметь значение коэффициент отражения, определяемый выражением

$$\delta_{отр} = \left| \frac{R_1 - Z_{вх}}{R_1 + Z_{вх}} \right|. \quad (17)$$

Коэффициент отражения связан с затуханием эхо известным соотношением:

$$b_в = \ln \frac{1}{\delta_{отр}}. \quad (18)$$

При проектировании электрических фильтров расчетчика в конечном итоге интересует обеспечение тех или иных рабочих характеристик фильтра, т. е. характеристик, которыми будет обладать фильтр в реальных условиях включения. Если расчет фильтра ведется по характеристическим параметрам, то для достижения требуемых рабочих характеристик необходимо установить соотношения между рабочими и характеристическими параметрами фильтра. Такие соотношения будут рассмотрены в следующей главе.

3. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ

В отечественной литературе наиболее распространенной единицей измерения затухания фильтров является *неп* (*nep*). Исходя из этого, затухание может быть определено из следующего выражения:

$$b_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_0}{P_2} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\dot{U}_0 I_0}{\dot{U}_2 I_2} \right| \text{ [nep]},$$

где $\dot{U}_0 = \dot{E}/2$ — падение напряжения на сопротивлении нагрузки при условии $R_2 = R_1$ и $I_0 = \dot{U}_0/R_2$.

Отсюда следует, что рабочее затухание, равное 1 *неп*, означает, что в нагрузку поступает мощность, в 7,4 раза меньшая, чем могла бы поступить в нагрузку, согласованную с генератором.

Если $R_2 = R_1$, то

$$b_p = \ln \left| \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_2} \right| = \ln \left| \frac{I_0}{I_2} \right| \text{ [nep]}. \quad (19)$$

Следовательно, затухание в 1 *неп* приводит к уменьшению напряжения на нагрузке \dot{U}_2 и тока, протекающего через нагрузку, I_2 в 2,72 раза по сравнению со значениями \dot{U}_0 и I_0 .

В радиотехнике затухание часто измеряют в децибелах, что приводит к другому масштабу отсчета. Так,

$$b_p = 10 \lg \frac{P_0}{P_2} = 10 \lg \left| \frac{\dot{U}_0 I_0}{\dot{U}_2 I_2} \right| \text{ [дб]} \quad (20)$$

означает, что затухание $b_p = 1$ *дб* приводит к уменьшению мощности, рассеиваемой в нагрузке, по сравнению с максимальной в 1,26 раза.

Сравнивая (19) и (20), можно получить соотношение между децибелами и неперами:

$$\begin{aligned} 1 \text{ неп} &= 8,68 \text{ дБ}; \\ 1 \text{ дБ} &= 0,115 \text{ неп}. \end{aligned}$$

ГЛАВА ВТОРАЯ

ФИЛЬТРЫ НИЖНИХ ЧАСТОТ

4. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ

Из теории цепей известно, что любой симметричный четырехполюсник может быть представлен в виде экви-

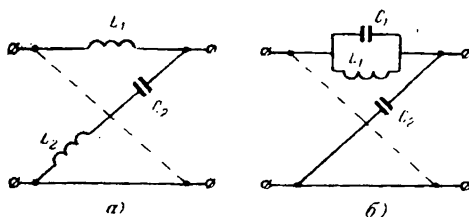


Рис. 6. Элементарные звенья ФНЧ.

валентной ему мостовой схемы. В связи с тем, что мостовые схемы наиболее удобны для анализа, представляется целесообразным исследовать звенья мостового типа, а затем уже готовые решения переносить на другие схемы, полученные путем эквивалентных преобразований исходной мостовой схемы.

Элементарный фильтр нижних частот может быть представлен в виде одной из мостовых схем, изображенных на рис. 6. Различие между схемами станет ясным из дальнейшего рассмотрения.

Рассмотрим характеристики одной из данных схем, например звена, представленного на рис. 6,а.

Для звеньев мостового типа известны выражения [Л. 1]:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{th} \frac{g_c}{2} &= \sqrt{\frac{Z_a}{Z_b}}; \\ Z_c &= \sqrt{Z_a Z_b}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где Z_a и Z_b — сопротивления продольного и поперечного плеч моста соответственно.

В схеме, изображенной на рис. 6,а:

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= j\omega L_1, \\ Z_b &= \frac{1 - \omega^2 L_2 C_2}{j\omega C_2}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Подставив (22) в (21), после преобразования получим:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{th} \frac{g_c}{2} &= \omega \sqrt{L_1 C_2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1}}; \\ Z_c &= \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (24)$$

Из выражения (23) видно, что частотам от 0 до ω_0 соответствует характеристическая полоса пропускания фильтра, а частотам от ω_0 до бесконечности — характеристическая полоса задерживания; ω_0 — частота среза фильтра.

Выражения (23) могут быть записаны в более удобной форме. С этой целью вводится понятие о нормированных (или нормализованных) величинах.

Под нормированной частотой фильтра нижних частот понимают отношение

$$x = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (25)$$

Обозначив далее

$$\sqrt{\frac{L_1}{C_2}} = R_0 \quad (26)$$

и разделив левую и правую части второго равенства (23) на R_0 , получим:

$$Z'_c = \frac{Z_c}{R_0} = \sqrt{1 - x^2}, \quad (27)$$

где R_0 — значение характеристического сопротивления при $x=0$;

Z'_c — нормированное характеристическое сопротивление фильтра.

Очевидно, что нормирование приводит к изменению уровня характеристического сопротивления; качественная характеристика его при этом не меняется.

Обозначив

$$\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = m \quad (28)$$

и подставив принятые обозначения (25), (26) и (28) в (23), получим:

$$\left. \begin{aligned} Z_c &= \sqrt{1 - x^2}; \\ \operatorname{th} \frac{g_c}{2} &= \frac{mx}{\sqrt{x^2 - 1}}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Здесь опущен штрих в обозначении нормированного характеристического сопротивления.

Из выражения (29) видно, что параметр m полностью определяет собственные характеристики элементарного звена фильтра нижних частот. Задаваясь произвольными значениями m , можно менять характеристику постоянной передачи фильтра.

Решив первое равенство (29) относительно g_c , получим:

$$g_c = \ln \frac{1 + \frac{mx}{\sqrt{x^2 - 1}}}{1 - \frac{mx}{\sqrt{x^2 - 1}}},$$

откуда

$$b_c = \ln \left| \frac{1 + \frac{mx}{\sqrt{x^2 - 1}}}{1 - \frac{mx}{\sqrt{x^2 - 1}}} \right|. \quad (30)$$

При некоторых значениях $x = x_\infty$, при которых знаменатель выражения (30) обращается в нуль, собственное затухание фильтра становится бесконечно большим. Такие частоты называют частотами бесконечного затухания.

Из выражения (30) можно определить частоту бесконечного затухания:

$$x_\infty = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}, \quad (31)$$

откуда

$$m = \frac{\sqrt{x_\infty^2 - 1}}{x_\infty}. \quad (32)$$

Из выражения (32) видно, что с изменением x_∞ от 1 до бесконечности параметр m изменяется от 0 до 1. Зна-

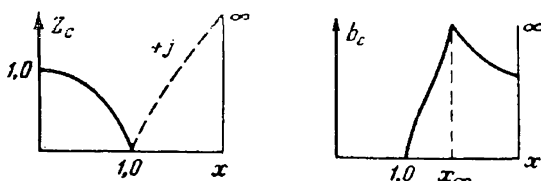


Рис. 7. Частотные характеристики звена ФНЧ класса 1A1n.

чениям $m > 1$ соответствуют мнимые значения частот бесконечного затухания.

На рис. 7 представлены характеристики собственного затухания и характеристического сопротивления рассматриваемого фильтра нижних частот.

Определим значения нормированных сопротивлений плеч мостовой схемы фильтра.

Решив (21) относительно Z_a и Z_b и подставив в полученные выражения значения $\text{th } g_c/2$ и Z_c из выражений (29), после преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= jmx; \\ Z_b &= j\frac{1}{m}x + \frac{1}{jmx}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Мостовая схема, плечи которой составляют сопротивления (33), представлена на рис. 8,а. На рис. 8,б и в

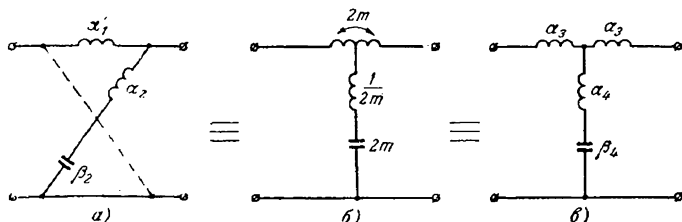


Рис. 8. Эквивалентные схемы звена ФНЧ класса 1A1n.

показаны эквивалентные преобразования полученной мостовой схемы. Все схемы на рис. 8 эквивалентны по частотным характеристикам, но различаются структурой и количеством элементов. Очевидно, наиболее экономичной из них по числу элементов является схема на рис. 8,б, содержащая взаимную индуктивность. Однако в практике обычно более желательны схемы, не содержащие взаимных индуктивностей. Объясняется это, во-первых, техническими трудностями, встречающимися при точном изготовлении взаимных индуктивностей. Кроме того, частотные характеристики цепочечных схем, не содержащих взаимных индуктивностей, менее чувствительны к отклонениям параметров элементов, имеющих место в результате либо неточности их изготовления, либо температурной и временной нестабильности.

В соответствии с выражениями (33) и обозначениями, принятыми на рис. 8,а и б, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 = m; \beta_2 = m; \alpha_4 = \frac{1-m^2}{2m}; \\ \alpha_2 = \frac{1}{m}; \alpha_3 = m; \beta_4 = 2m, \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где α и β — нормированные коэффициенты элементов схемы;

α — нормированный коэффициент индуктивности;

β — нормированный коэффициент емкости.

Зная величины нормированных коэффициентов элементов, легко определить их номинальные значения:

$$\left. \begin{aligned} L_n &= \alpha_n \frac{R_0}{\omega_0}; \\ C_n &= \beta_n \frac{1}{R_0 \omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Следует отметить, что цепочечная схема реализуется только при $m \leq 1$. Если $m > 1$, то, как видно из (34), индуктивность L_4 становится отрицательной.

Пользуясь аналогичным методом, можно провести анализ второго исходного звена фильтра нижних частот, представленного на рис. 6,б. На рис. 9 приведены мостовая и эквивалентная ей цепочечная схемы фильтра нижних частот второго вида.

Значения нормированных коэффициентов элементов в соответствии с их обозначениями на рис. 9 следующие:

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_1 = \beta'_2 = \beta'_4 = m; \quad \alpha'_3 = 2m; \\ \beta'_1 = \frac{1}{m}; \quad \beta'_3 = \frac{1-m^2}{2m}, \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

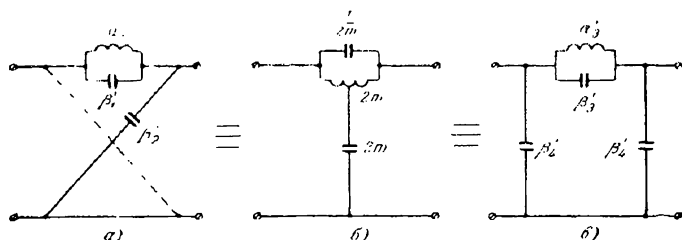


Рис. 9. Эквивалентные схемы звена ФНЧ класса 1В1н.

На рис. 10 представлены характеристики собственного затухания и характеристического сопротивления для данного типа звена.

Если $m=1$, то в схемах на рис. 8,в и 9,в коэффициенты α_4 и β'_3 становятся равными нулю. Такие схемы называют звеньями типа К.

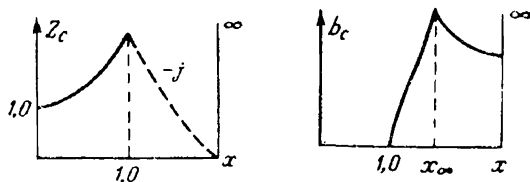


Рис. 10. Частотные характеристики звена ФНЧ класса 1В1н.

Звенья, изображенные на рис. 8,в и 9,в, могут быть представлены в виде каскадного соединения двух полузвеньев (рис. 11). Если каждую из пар полузвеньев соединить каскадно зажимами 1-2 и 1'-2', то получатся схемы, которые по характеристикам постоянной передачи будут аналогичны исходным звеньям, но функции характеристических сопротивлений их будут иными. Схемы таких звеньев и функции их характеристических сопротивлений приведены на рис. 12,а и б.

Существенное различие между функциями характеристических сопротивлений ранее рассмотренных схем и схем, представленных на рис. 12, состоит в том, что в первом случае величина характеристического сопро-

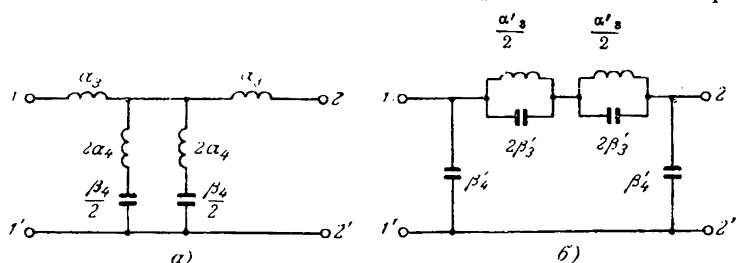


Рис. 11. Преобразование звеньев ФНЧ.

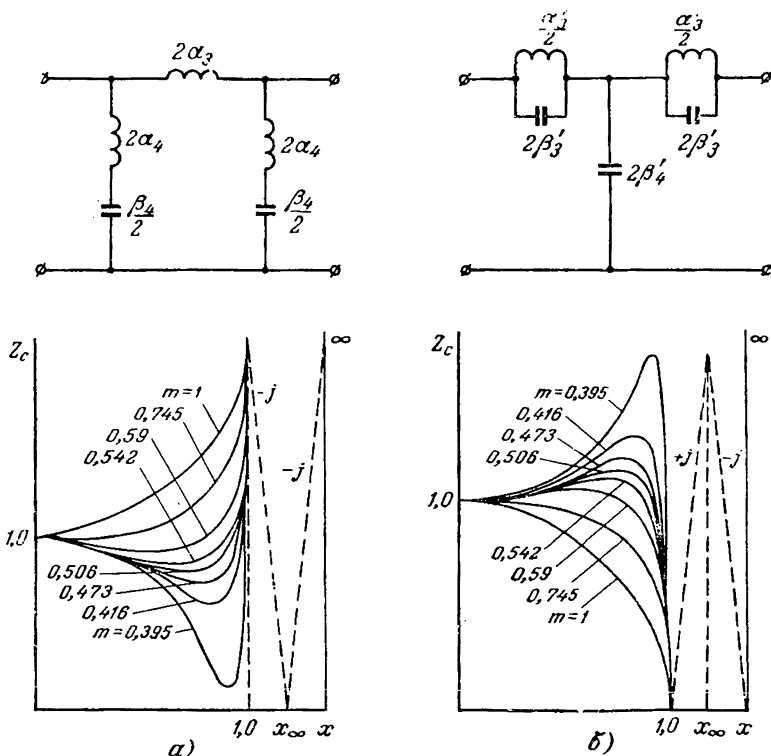


Рис. 12. Звенья ФНЧ и функции характеристического сопротивления их.

а — класса 2В; б — класса 2А.

тивления 1 раз становится равной 1 (на нулевой «частоте»), тогда как во втором случае характеристическое сопротивление может дважды в полосе пропускания обращаться в 1 (в том числе и на нулевой «частоте»).

5. КЛАССЫ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ И ЗАТУХАНИЮ

Выше было установлено, что функции характеристических сопротивлений для фильтров нижних частот определяются схемным окончанием фильтра. Так, в фильтрах на рис. 8 и 12,б характеристическая полоса пропускания ограничена значениями характеристического сопротивления, равными 1 (на нулевой «частоте») и нулю (на частоте среза); в фильтрах, представленных на рис. 9 и 12,а, функции характеристических сопротивлений носят обратный характер, т. е. на границах полосы пропускания Z_c обращается соответственно в 1 и бесконечность. Звенья фильтров нижних частот с характеристическим сопротивлением первого вида будем обозначать буквой «А», звенья второго вида — буквой «В».

Если фильтр нижних частот нагрузить на активные сопротивления, то их величина всегда может быть выбрана таким образом, чтобы она совпадала с одним из значений характеристического сопротивления фильтра в полосе пропускания. Для схем, приведенных на рис. 8 и 9, очевидно, что значения характеристического сопротивления и нагрузочных сопротивлений могут совпадать лишь на одной частоте. Для звеньев, изображенных на рис. 12, величины нагрузочных сопротивлений можно подобрать так, что они будут на двух частотах пересекать линию характеристического сопротивления.

В первом случае фильтр может быть идеально согласован лишь на одной частоте, во втором — на двух частотах. Число таких возможных точек согласования определяет класс фильтра по сопротивлению. Тогда, очевидно, звенья на рис. 8 и 9 должны быть отнесены к фильтрам нижних частот 1-го класса по сопротивлению; соответственно звенья на рис. 12 являются фильтрами 2-го класса по сопротивлению. С учетом принятых выше буквенных обозначений звено, изображенное на рис. 8, имеет класс по сопротивлению 1А, а звено на рис. 12,а имеет класс по сопротивлению 2В и т. д.

Известны схемы фильтров нижних частот более вы-

сокого класса по сопротивлению, однако на практике они применяются редко и мы их рассматривать не будем.

Под классом фильтра по затуханию будем понимать число элементарных звеньев, из которых составлена схема фильтра. При четном числе полувзвеньев класс фильтра выражается целым числом, при нечетном числе их — дробным. Очевидно, минимальный класс фильтра по затуханию равен 0,5, что соответствует половине элементарного звена фильтра нижних частот.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ

6. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРОВ

Требования, предъявляемые к характеристике фильтров в полосе задерживания, диктуются необходимостью получить заданный минимум затухания в указанной полосе частот. При этом, очевидно, возникает задача распределить частоты бесконечного затухания таким образом, чтобы гарантировать требуемое затухание минимально возможным числом элементарных звеньев фильтра. В общем случае, когда требуемые минимумы собственного затухания в полосе задерживания неодинаковы, решение такой задачи представляется довольно сложным.

Задача значительно упрощается, если в полосе задерживания необходимо получить одинаковый минимум собственного затухания b_{\min} . В теории электрических фильтров известны решения, которые позволяют в этом случае аналитическим путем определить значение частот бесконечного затухания $x_{\infty y}$, обеспечивающие при данном классе фильтра по затуханию наибольшее значение минимума собственного затухания в полосе задерживания.

Область частот в характеристической полосе задерживания, где гарантируется заданный минимум собственного затухания, называют эффективной полосой задерживания. Для фильтра нижних частот под эффективной полосой задерживания будем понимать полосу частот, расположенную выше некоторой частоты f_e , называемой крайней задерживаемой частотой.

Задача аналогичного характера имеет место и для полосы пропускания фильтра. В фильтре без потерь амплитудные искажения в полосе пропускания определяются несогласованностью характеристического сопротивления фильтра с нагрузочными сопротивлениями. С увеличением класса фильтра по сопротивлению условия согласования улучшаются, однако при этом появляются дополнительные элементы в конечных полужвеньях фильтра, определяющих класс фильтра по сопротивлению.

Задача наилучшего согласования фильтра с нагрузками сводится к тому, чтобы при заданном классе фильтра по сопротивлению затухания несогласованности b_n определялись выражением

$$b_n = \ln \left| \frac{R + Z_c}{R - Z_c} \right|, \quad (37)$$

где R — сопротивление нагрузки.

Область в характеристической полосе пропускания, где гарантируется заданный минимум затухания несогласованности, называют эффективной полосой пропускания. Для фильтра нижних частот будем понимать под эффективной полосой пропускания полосу частот, расположенную ниже некоторой заданной частоты f_{el} , называемой крайней передаваемой частотой.

Параметры, при которых при заданном классе фильтра по сопротивлению и затуханию можно получить максимально возможные значения b_n и $b_{мин}$ в заданных полосах пропускания и задерживания соответственно, будем называть оптимальными.

Ниже излагается метод определения оптимальных характеристических параметров фильтра нижних частот без потерь. Расчетные формулы приводятся в основном в том виде, в каком они представлены в работе [Л. 1]. Формулы здесь даются без вывода, но сопровождаются необходимыми пояснениями.

7. ВЫБОР КЛАССА ФИЛЬТРА ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ

Класс фильтра по сопротивлению определяют по допустимому значению минимума затухания несогласованности $b_{н.мин}$ и коэффициенту использования полосы пропускания.

Из теории фильтров известно, что затухание эхо в полосе пропускания может быть меньше затухания несогласованности на величину, не превышающую 0,69 *неп*. Отсюда следует, что при расчете электрических фильтров необходимо задаваться значением $b_{н.мин}$ на 0,69 *неп* больше требуемого минимального значения затухания эхо:

$$b_{н.мин} = b_э + 0,69 [\text{неп}]. \quad (38)$$

Соотношение между затуханием эхо и рабочим затуханием известно.

Из выражения (16) имеем:

$$b_э = -\ln \sqrt{1 - e^{-2b_p}}. \quad (39)$$

Таким образом, по заданному максимальному значению рабочего затухания в полосе пропускания пользуясь выражениями (39) и (38), нетрудно определить минимально допустимую величину затухания несогласованности.

Под коэффициентом использования полосы пропускания фильтра нижних частот K_1 будем понимать отношение крайней передаваемой частоты к частоте среза, т. е.

$$K_1 = \frac{f_{e1}}{f_1}. \quad (40)$$

Коэффициент K_1 , класс фильтра по сопротивлению N и $b_{н.мин}$ связаны следующими соотношениями:

$$K_1 = \sqrt{1 - K_x^4}, \quad (41)$$

где

$$K_x = \frac{e^{b_{0н}} - 1}{e^{b_{0н}} + 1}, \quad (42)$$

и

$$b_{н0} = \frac{b_{н.мин} - (N - 1) \cdot 0,69}{N}. \quad (43)$$

При выборе класса фильтра по сопротивлению задаются сначала значением $N=1$; по формуле (43) вычисляют $b_{0н}$, а затем, пользуясь выражениями (41) и (42), определяют K_1 . Подставив значения K_1 и f_{e1} в (40), вычисляют частоту среза f_1 . Если значение f_1

оказывается меньше заданной крайней задерживаемой частоты f_e , то класс фильтра по сопротивлению выбран правильно. Если же частота среза f_1 попадает в рабочую полосу задерживания (т. е. $f_1 > f_e$), то следует задаться значением $N=2$ и повторить весь расчет по формулам (40) — (43).

На рис. 13 показана зависимость максимального значения рабочего затухания от коэффициента использования полосы пропускания K_1 для значений $N=1$ и $N=2$ при оптимальном выборе параметров фильтра.

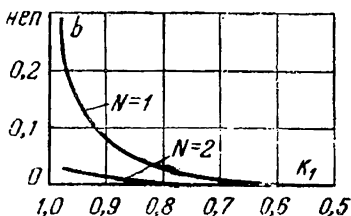


Рис. 13. Зависимость максимального значения b_p в полосе пропускания от K_1 и класса по сопротивлению.

Из рис. 13 видно, что при классе фильтра по сопротивлению $N=2$ амплитудные искажения, обусловленные несогласованностью фильтра, достаточно малы при K_1 , близком к единице.

Функция характеристического сопротивления 1-го класса не зависит от параметра m . Поэтому с точки зрения обеспечения заданной величины $b_{н.мин}$ при конструировании схемы фильтра не имеет значения, какие полувзвенья будут выбраны в качестве окончных.

В фильтрах 2-го класса по сопротивлению функция характеристического сопротивления зависит от значения параметра m . В этом случае для оптимального согласования в качестве окончных следует взять полувзвенья, имеющие

$$m_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{K_x}{1 + K_x}}. \quad (44)$$

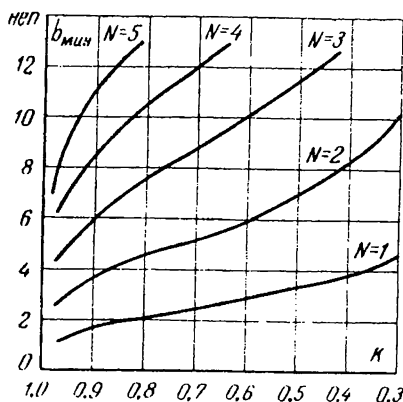
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ФИЛЬТРА ПО ЗАТУХАНИЮ

Класс фильтра по затуханию определяют по заданному значению минимального собственного затухания в полосе задерживания $b_{\text{мин}}$ и коэффициенту использования полосы задерживания K .

Между собственным и рабочим затуханием фильтра в полосе задерживания существует соотношение, аналогичное установленному ранее для $b_{н.мин}$ и b_3 . Рабочее затухание фильтра в полосе задерживания может ока-

заться меньше собственного затухания на величину, не превышающую 0,69 *неп*. Отсюда следует, что при выборе минимального значения собственного затухания необходимо задаться величиной $b_{\text{мин}}$ на 0,69 *неп* больше требуемого рабочего затухания в полосе задерживания, т. е.

$$b_{\text{мин}} = b_p + 0,69 [\text{неп}]. \quad (45)$$



Под коэффициентом использования полосы задерживания K для фильтров нижних частот будем понимать отношение частоты среза к крайней задерживаемой частоте:

$$K = \frac{f_1}{f_e}. \quad (46)$$

Класс фильтра по затуханию N определяется из выражения

$$N \geq \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{b_0 + 0,69}, \quad (47)$$

Рис. 14. Зависимость $b_{\text{мин}}$ от коэффициента K и класса по затуханию.

где

$$b_0 = \ln \frac{1 + \sqrt[4]{1 - K^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - K^2}}. \quad (48)$$

Полученное значение N округляют до ближайшего большего числа, кратного 0,5.

На рис. 14 приведены зависимости $b_{\text{мин}}$ от K при разных значениях N .

Зная класс фильтра по затуханию и коэффициент использования полосы задерживания, можно определить оптимальные значения частот бесконечного затухания x_∞ и параметра m по формуле

$$m_v = \frac{1 + \frac{1 - \sqrt[4]{1 - K^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - K^2}} \cos \frac{2v - 1}{2N} \pi}{1 - \frac{1 - \sqrt[4]{1 - K^2}}{1 + \sqrt[4]{1 - K^2}} \cos \frac{2v - 1}{2N} \pi} \sqrt[4]{1 - K^2}, \quad (49)$$

где $v=1, 2, 3 \dots$ для целого числа звеньев, или

$$m_v = \frac{1 + \frac{1 - \sqrt[4]{1-K^2}}{1 + \sqrt[4]{1-K^2}} \cos \frac{v-1}{N} \pi}{1 - \frac{1 - \sqrt[4]{1-K^2}}{1 + \sqrt[4]{1-K^2}} \cos \frac{v-1}{N} \pi} \sqrt[4]{1-K^2}, \quad (50)$$

где $v=(1, 2, 3, \dots)N+0,5$ для дробного числа звеньев.

На основании (31)

$$x_{\infty v} = \frac{1}{\sqrt[4]{1-m_v^2}}. \quad (51)$$

Необходимо заметить, что схема фильтра дробного класса по затуханию должна содержать одно полузвено типа K .

В расчетных табл. 2—9 вычислены оптимальные значения параметров m_v и $x_{\infty v}$ для величин N от 1,0 до 5,5 при K от 0,3 до 0,97.

Значения N и K , для которых вычислены оптимальные параметры m_v и $x_{\infty v}$, в значительной мере исчерпывают практическую потребность в фильтрах нижних частот.

9. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ФИЛЬТРОВ

Зная класс фильтра по сопротивлению, затуханию и пользуясь данными табл. 10, можно сконструировать схему и определить нормированные коэффициенты элементов фильтра нижних частот. Для завершения расчета фильтра необходимо вычислить номинальные значения индуктивностей и емкостей, входящих в схему фильтра.

Выше были установлены выражения для определения значений элементов фильтра:

$$\left. \begin{aligned} L_n &= \alpha_n \frac{R_0}{\omega_0}; \\ C_n &= \beta_n \frac{1}{R_0 \omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Величина $\omega_0=2\pi f_1$ в выражениях (35) теперь известна, так как частота среза f_1 определена из выражения (40). Нормированные коэффициенты α_n и β_n легко вычислить, зная соответствующие значения параметра m_v и схему фильтра.

Таким образом, для определения L_n и C_n остается установить величину номинального значения характеристического сопротивления фильтра нижних частот на нулевой «частоте» R_0 , которая определяется из условия достижения заданного минимума затухания несогласованности в эффективной полосе пропускания при заданном сопротивлении нагрузки фильтра.

При оптимальном выборе параметров фильтра значение R_0 определяется из следующих выражений:

$$R_0 = \frac{R_H}{\rho_1}, \quad (52)$$

где

$$\rho_1 = \frac{e^{b_{H, \text{мин}}} - 1}{e^{b_{H, \text{мин}}} + 1} \quad (53)$$

для класса фильтра по сопротивлению NA при N нечетном и NB при N четном или

$$\rho_1 = \frac{e^{b_{H, \text{мин}}} + 1}{e^{b_{H, \text{мин}}} - 1} \quad (54)$$

для класса фильтра по сопротивлению NA при N четном и NB при N нечетном.

На рис. 15 приведены значения ρ_1 в зависимости от коэффициента использования полосы пропускания K_1 для ФНЧ 1-го и 2-го классов по сопротивлению.

В выражении (52) R_H — сопротивление нагрузки. Если фильтр симметричный, то

$$R_{H1} = R_{H2} = R_H,$$

где R_{H1} и R_{H2} — нагрузочные сопротивления на входе и выходе фильтра.

Если схема фильтра антисимметрична (т. е. $Z_{c1}Z_{c2} = R_0^2$), то

$$R_{H2} = \frac{R_{H1}}{\rho_1^2}. \quad (55)$$

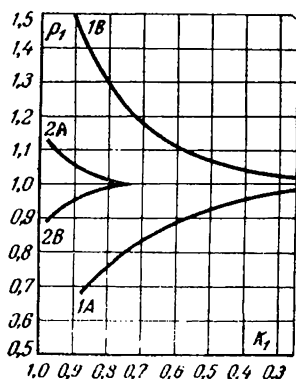


Рис. 15. Зависимость ρ_1 от K_1 и класса по сопротивлению.

В антисимметричных фильтрах представляется возможным задаваться величиной только одного нагрузочного сопротивления; величина второго нагрузочного сопротивления устанавливается расчетным путем.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ

10. РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА-ПРОТОТИПА

В гл. 3 был рассмотрен метод расчета оптимальных параметров фильтров нижних частот.

Представляется возможным воспользоваться полученными результатами для проектирования других типов фильтров. Для этого достаточно установить соответствие между характеристиками проектируемого фильтра и некоторого вспомогательного фильтра нижних частот. Установив такое соответствие, можно свести расчет заданного фильтра к расчету фильтра нижних частот. Вспомогательный фильтр нижних частот, с помощью которого осуществляется расчет фильтра заданного типа, часто называют фильтром-прототипом.

Основой метода проектирования фильтров с помощью фильтров-прототипов является преобразование частоты. Пусть, например, требуется спроектировать фильтр верхних частот с полосой задерживания

$$f = 0 \div f = f_a$$

и полосой пропускания

$$f = f_{a1} \div f = \infty.$$

Введем обозначение

$$f' = \frac{f_0^2}{f}, \quad (56)$$

где f_0 — некоторая произвольно выбранная частота;

f' — переменная, имеющая размерность частоты.

Требования, предъявляемые к фильтру, теперь могут быть переписаны в виде:

для полосы задерживания фильтра

$$f' = \infty \div f' = f'_a = \frac{f_0^2}{f_a};$$

для полосы пропускания

$$f' = f'_{a1} = \frac{f_0^2}{f_{a1}} \div f' = 0.$$

Таким образом, в результате преобразования частоты из формулы (56) получены требования, характерные для фильтра нижних частот; при этом все требования, которые предъявляются к частотным характеристикам фильтра верхних частот, переносятся на низкочастотный фильтр-прототип. Фильтр-прототип рассчитывается способом, описанным в предыдущей главе, после чего легко определить параметры проектируемого фильтра верхних частот. Для этого достаточно воспользоваться обратным преобразованием частоты

$$f = \frac{f_0^2}{f'}.$$

В табл. 1 приводится сводка формул, устанавливающая связь между частотными характеристиками фильтров ВЧ, ПФ и ЗФ, с одной стороны, и низкочастотного фильтра-прототипа — с другой.

Важно подчеркнуть, что преобразование частоты фильтра-прототипа, указанное в таблице, приводит к получению полосовых и заграждающих фильтров, частотные характеристики которых симметричны относительно центральной частоты f_0 .

Симметрия выражается соотношениями:

$$f_1 f_2 = f_{e1} f_{a1} = f_e f_a = f_0^2, \quad (57)$$

где f_1, f_2 — частоты среза ПФ и ЗФ;
 f_0 — средняя частота ПФ и ЗФ.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$$x' = \frac{f}{f_1} \quad (58)$$

— нормированная частота фильтра ВЧ; здесь f_1 — частота среза фильтра ВЧ;

$$\eta = \frac{f}{f_0} \quad (59)$$

— нормированная частота ПФ;

$$\eta' = \frac{f}{f_0} \quad (60)$$

— нормированная частота ЗФ.

Для полосовых и заграждающих фильтров

$$n = \frac{f_0}{f_2 - f_1}. \quad (61)$$

При расчете полосовых и заграждающих фильтров следует учесть, что класс проектируемого фильтра по сопротивлению и затуханию оказывается вдвое выше, чем соответствующий класс фильтра-прототипа. Объясняется это тем, что в результате преобразований частоты по формулам табл. 1 (строка 7) характеристика фильтра-прототипа на каждой частоте копируется здесь на двух частотах, среднее геометрическое которых равно средней частоте фильтра.

Для фильтров верхних частот и фильтров-прототипов классы по сопротивлению и затуханию совпадают.

ГЛАВА ПЯТАЯ ФИЛЬТРЫ С ПОТЕРЯМИ

11. ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОВ

Реализация электрических фильтров при помощи реальных катушек индуктивности и конденсаторов, имеющих конечные добротности, приводит к появлению необратимых потерь мощности в схеме фильтра.

Конденсаторы, изготавливаемые в настоящее время, имеют как правило, добротность на порядок выше добротности, реализуемой в катушках индуктивности. Поэтому ясно, что потери в схеме фильтра будут в основном определяться потерями в катушках индуктивности.

Наличие потерь в элементах определенным образом сказывается на частотных характеристиках фильтра. Наиболее заметно потери влияют на характеристику затухания фильтра в полосе пропускания и в окрестностях частот бесконечного затухания.

Из теории фильтров известны выражения, позволяющие определить величину собственного затухания фильтра на частоте бесконечного затухания при заданной добротности элементов. Выражения эти приводятся в табл. 10—13 для разных типов фильтров и при необходимости могут быть использованы расчетчиком.

Обычно более важным при проектировании электрических фильтров оказывается необходимость оценить

влияние потерь на величину затухания в полосе пропускания. В табл. 10—13 приводятся расчетные формулы для определения собственного затухания элементарных звеньев фильтров разных типов в полосе пропускания при заданных значениях параметра m и добротности элементов.

Для того чтобы оценить влияние потерь, необходимо предварительно произвести расчет, связанный с определением всех параметров, входящих в указанные формулы. В результате расчета характеристики собственного затухания в полосе пропускания вследствие влияния потерь часто оказывается, что амплитудные искажения превышают допустимые. Если при этом не представляется возможности увеличить добротность элементов, то приходится заново пересчитывать фильтр, задаваясь другими исходными данными.

Однако при расчете оптимальных параметров фильтров можно оценить влияние потерь на характеристику собственного затухания в полосе пропускания уже на начальном этапе проектирования. Это обстоятельство позволяет при выборе исходных данных для расчета фильтра (например, коэффициента использования полосы пропускания) оценить минимальную величину добротности элементов, необходимую для реализации требуемых характеристик фильтра.

Так как наиболее заметно в полосе пропускания потери сказываются на частотах, ближайших к частотам среза, то особый интерес представляет оценка влияния потерь на крайних передаваемых частотах.

Для полосовых фильтров интерес представляет также затухание на центральной частоте.

Полагая, что на частотах, достаточно удаленных в полосе пропускания от частоты среза, влияние потерь на характеристику затухания фильтра мало, можно считать, что неравномерность в полосе пропускания вследствие потерь для фильтров НЧ, ВЧ и ЗФ будет определяться величиной собственного затухания на крайних передаваемых частотах; в полосовых фильтрах неравномерность частотной характеристики вследствие потерь определяется разностью затуханий на центральной и крайних передаваемых частотах.

Ниже приводятся формулы для определения собственного затухания вследствие потерь в фильтрах, имеющих оптимальные параметры.

Для получения формул были использованы соответствующие выражения, предложенные С. С. Коганом, и некоторые приближения, приведенные в [Л. 2] для значений коэффициента использования полосы задерживания K в пределах $0,3 \leq K \leq 0,97$. Указанные пределы изменений K почти исчерпывают встречающиеся на практике фильтры. В случае, когда в проектируемом фильтре значение K превышает 0,97, для расчета затухания в полосе пропускания, обусловленного потерями, следует воспользоваться формулами, приведенными в табл. 10—13.

Отметим, что при оптимальном расчете характеристических параметров фильтров собственное затухание, обусловленное потерями, будет незначительно отличаться от рабочего затухания. Поэтому с достаточной для практики точностью в приведенных ниже формулах под затуханием $b_{\text{д}}$ можно понимать также рабочее затухание фильтра в полосе пропускания вследствие потерь.

Для фильтров нижних частот затухание на крайней передаваемой частоте

$$b_{\text{н}} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_{\text{н.ч}} [\text{неп}], \quad (62)$$

где

$$d_{\text{н.ч}} = \frac{0,36K + 0,28}{V(1-\mu^2)(1-K_1^2)}; \quad (63)$$

$$\mu = \frac{f_{e1}}{f_e} = K_1 K. \quad (64)$$

Для фильтров верхних частот затухание на крайней передаваемой частоте

$$b_{\text{в}} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_{\text{в.ч}} [\text{неп}], \quad (65)$$

где

$$d_{\text{в.ч}} = \frac{0,36K + 0,28}{V(1-\mu^2)(1-K_1^2)} K_1^2; \quad (66)$$

$$\mu = \frac{f_a}{f_{a1}} = K_1 K. \quad (67)$$

Для полосовых фильтров:

а) на крайних передаваемых частотах

$$b_{\text{п}} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_{\text{п.ф}} \frac{f_0}{f_{e1} - f_{a1}} \left(1 + \frac{f_0^2}{f_{e1}^2 - f_{a1}^2} \right) [\text{неп}], \quad (68)$$

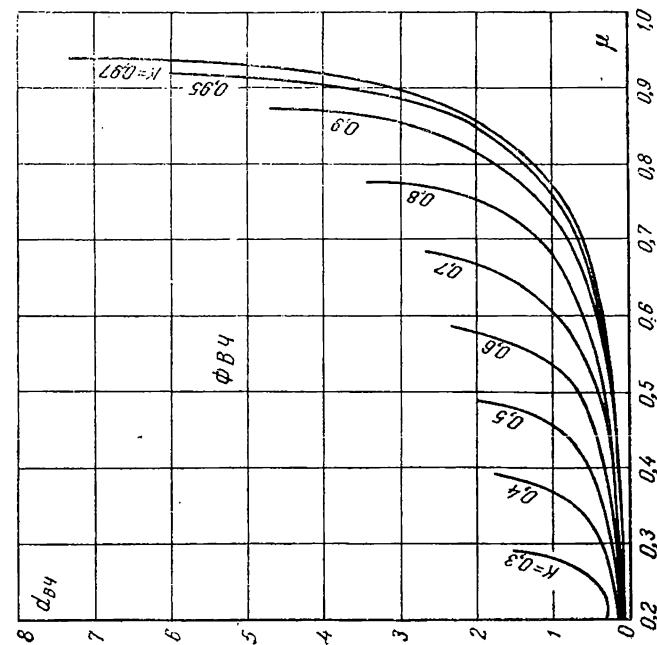


Рис. 16. Кривые для определения затухания b_d в ФВЧ.

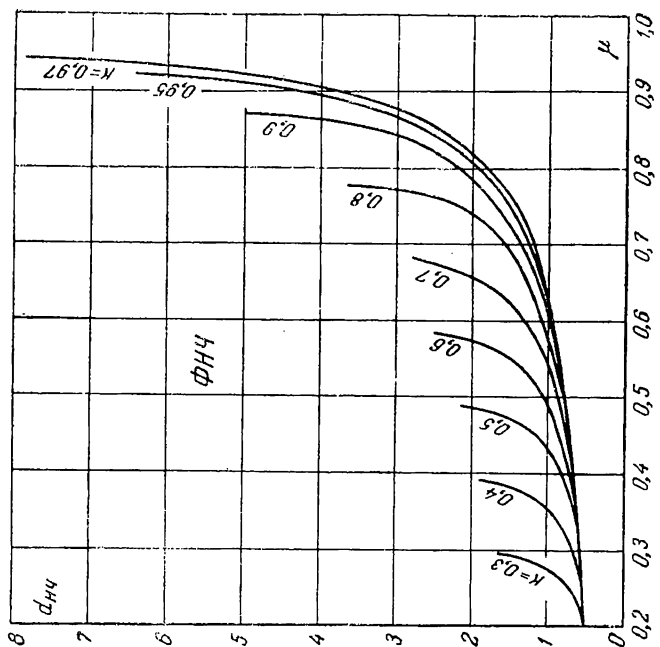


Рис. 17. Кривые для определения затухания b_d в ФНЧ.

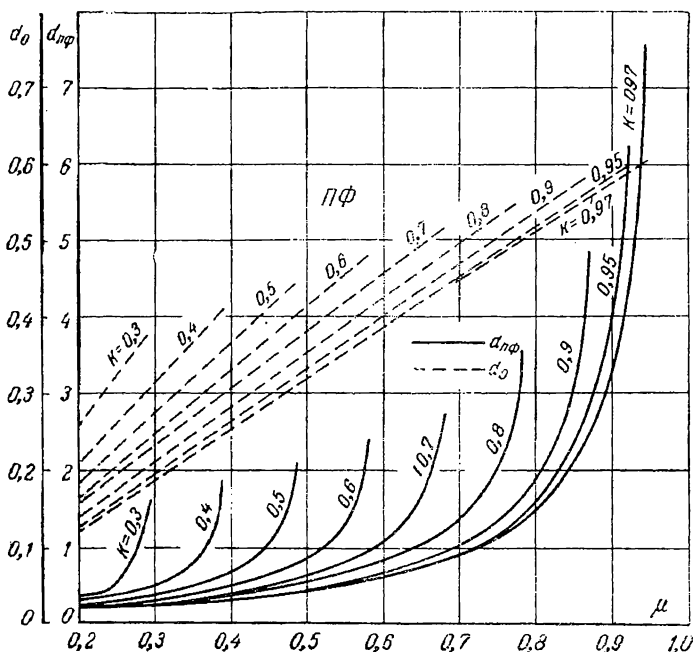


Рис. 18. Кривые для определения затухания b_n в ПФ.

где

$$d_{n.\phi} = \frac{0,36K + 0,28}{\sqrt{(1 - \mu^2)(1 - K^2)}} K_1; \quad (69)$$

б) на центральной частоте

$$b_n = \frac{1}{Q} \cdot \frac{b_{мин} + 0,69}{2} d_0 \frac{2f_0}{f_{e1} - f_{a1}} [\text{нел}], \quad (70)$$

где

$$d_0 = \left(0,36 + \frac{0,28}{K} \right) \mu. \quad (71)$$

В выражениях (63) — (66)

$$\mu = \frac{f_{a1} - f_{e1}}{f_a - f_0} = K_1 K. \quad (72)$$

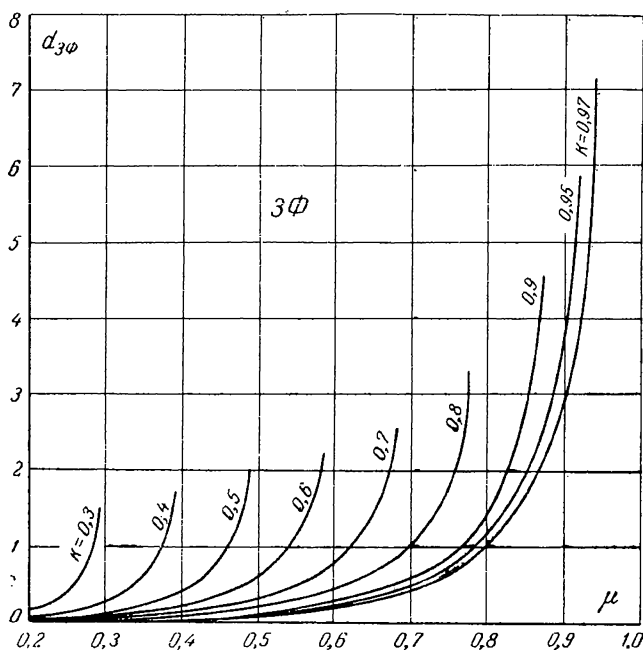


Рис. 19. Кривые для определения затухания b_{Π} в 3Ф.

Для заграждающих фильтров на крайних передаваемых частотах

$$b_{\Pi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_{3\phi} \frac{f_0}{f_{a1} - f_{e1}} \left(1 + \frac{f_0^2}{f_{e1; a1}^2} \right) [\text{неп}], \quad (73)$$

где

$$d_{3\phi} = \frac{0,36K + 0,28}{\sqrt{(1 - \mu^2)(1 - K_1^2)}} K_1^3; \quad (74)$$

$$\mu = \frac{f_a - f_e}{f_{a1} - f_{e1}} = K_1 K. \quad (75)$$

Полагаем, что потери в конденсаторах существенно меньше, чем в катушках индуктивности. Поэтому под Q в приведенных выше формулах следует понимать добротность катушек индуктивности на частоте, для которой рассчитывается затухание вследствие потерь.

На рис. 16—19 представлены значения $d_{\Pi.ч}$, $d_{\Pi.ч}$, $d_{\Pi.ф}$, d_0 и $d_{3\phi}$ в зависимости от величины μ для различных зна-

чений коэффициента использования полосы задерживания K . Пользуясь указанными кривыми и выражениями (62) — (75), нетрудно оценить влияние потерь на характеристику собственного затухания фильтра в полосе пропускания и минимальную добротность, необходимую для реализации требуемой частотной характеристики.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ФИЛЬТРОВ

12. РАСЧЕТ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Рассчитать фильтр нижних частот по следующим техническим требованиям:

а) Полоса эффективно передаваемых частот 0—2 000 гц; амплитудные искажения в полосе пропускания не должны превышать 0,345 *неп*.

б) В полосе задерживания, начиная с частоты 4 000 гц, рабочее затухание должно быть не менее 6 *неп*.

в) Фильтр включается между нагрузочными сопротивлениями 1 000 ом.

1. Выбор класса фильтра по характеристическому сопротивлению

В проектируемом фильтре амплитудные искажения в эффективно передаваемой полосе частот не должны превышать затухания 0,345 *неп* (3 дб), которое будет складываться из затухания вследствие несогласованности характеристического сопротивления с сопротивлениями нагрузок и затухания, обусловленного потерями. Для определения класса фильтра по характеристическому сопротивлению зададимся ориентировочной величиной затухания вследствие несогласованности 0,1 *неп*.

Тогда затухание α_0 [см. (39)]

$$b_0 = -\ln \sqrt{1 - e^{-2b_p}} = 0,855 \text{ неп.}$$

Задаемся величиной затухания несогласованности [см. (38)]

$$b_{н.мин} = b_0 + 0,69 = 1,6 \text{ неп.}$$

Берем характеристическое сопротивление 1-го класса [см. (43, 42)]. Тогда

$$b_{\text{он}} = \frac{b_{\text{р.мин}}(N-1) \cdot 0,69}{N} = 1,55 \text{ неп}$$

и

$$K_x = \frac{e^{b_{\text{он}}} - 1}{e^{b_{\text{он}}} + 1} = 0,65.$$

Определим коэффициент использования полосы пропускания¹ [см. (41, 42)]:

$$K_1 = \sqrt{1 - K_x^4} = 0,906.$$

Так как

$$K_1 = \frac{f_{e1}}{f_1},$$

то частота среза

$$f_1 = \frac{f_{e1}}{K_1} = 2\,198 \text{ гц.}$$

Так как полученная частота $f_1 = 2\,198 \text{ гц}$ меньше крайней задерживаемой частоты $4\,000 \text{ гц}$, то класс фильтра по сопротивлению выбран правильно.

2. Выбор класса фильтра по затуханию

Для получения гарантированного рабочего затухания в полосе задерживания 6 неп задаемся собственным затуханием [см. (45)].

$$b_{\text{мин}} = b_{\text{р}} + 0,69 = 6,7 \text{ неп.}$$

Определим коэффициент использования полосы задерживания [см. (46)]:

$$K = \frac{f_1}{f_*} = \frac{2\,198}{4\,000} = 0,55$$

¹ Величина коэффициента использования полосы пропускания K_1 в зависимости от заданного значения и класса фильтра по сопротивлению может быть выбрана по кривым на рис. 13. В таком случае расчет, проведенный по формулам (38), (39) и (41) — (43), нужно будет опустить.

и расчетный параметр [см. (48)]:

$$b_0 = \ln \frac{1 + \sqrt[4]{1 - K^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - K^2}} = 3,12.$$

Тогда класс фильтра по затуханию [см. (47)]:

$$N \geq \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{b_0 + 0,69} = 1,93.$$

Следовательно, необходимо взять два элементарных звена фильтра нижних частот. При этом минимальное собственное затухание фильтра

$$b_{\text{мин}} = N(b_0 + 0,69) - 0,69 = 6,93 \text{ неп.}$$

Можно несколько увеличить коэффициент использования полосы задерживания, что приведет к соответствующему уменьшению коэффициента использования полосы пропускания. С этой целью определим b_0 и K при $N=2$. Из выражения (47)

$$b_0 = \frac{b_{\text{мин}} - (N-1) \cdot 0,69}{N} = 3,0 \text{ неп.}$$

Из выражения (48)

$$K = \sqrt{1 + \left(\frac{e^{b_0} - 1}{e^{b_0} + 1} \right)^2} = 0,575.$$

Целесообразно выбрать значение $K=0,56$, так как при этом представится возможным использовать табл. 2 для определения частот бесконечного затухания и оптимальных значений параметра m .

Тогда окончательно будем иметь

$$K=0,56.$$

Частота среза вычисляется из выражения (46):

$$f_1 = K f_c = 2\,240 \text{ гц.}$$

Коэффициент использования полосы пропускания

$$K_1 = \frac{f_{c1}}{f_1} = 0,893$$

и далее из выражения (41)

$$K_x = \sqrt[4]{1 - K_1^2} = 0,67.$$

Из выражения (42)

$$b_{0H} = \ln \frac{1 + K_x}{1 - K_x} = 1,62 \text{ nep.}$$

Из выражения (43)

$$b_{H.MHH} = b_{0H} = 1,62 \text{ nep.}$$

Из выражения (38)

$$b_3 = b_{H.MHH} - 0,69 = 0,93 \text{ nep.}$$

При этом рабочее затухание в полосе пропускания, обусловленное несогласованностью, может достигать величины

$$b_p = -\ln \sqrt{1 - e^{-2b_3}} = 0,09 \text{ nep.}$$

Далее из табл. 5 имеем при $N=2$ и $K=0,56$:

$$x_{\infty 1} = 4,317; \quad x_{\infty 2} = 1,908;$$

$$m_1 = 0,973; \quad m_2 = 0,852.$$

3. Выбор схемы и расчет элементов

Возьмем два звена типа m класса 1В1 по табл. 10. Схема фильтра представлена на рис. 20, а ее элементы могут быть определены по данным табл. 10 [см. (54, 52)]:

$$\rho_1 = \frac{e^{b_{H.MHH}} + 1}{e^{b_{H.MHH}} - 1} = 1,495;$$

$$R_0 = \frac{R_H}{\rho_1} = 668 \text{ ом};$$

$$L = \frac{R_0}{2\pi f_1} = 47,5 \text{ мГн}; \quad C = \frac{1}{2\pi f_1 R_0} = 106 \cdot 10^3 \text{ пФ};$$

$$\alpha_1 = 2m_1 = 1,95; \quad \alpha_2 = 2m_2 = 1,70;$$

$$\beta_1 = \frac{1 - m_1^2}{2m_1} = 0,0289; \quad \beta_2 = \frac{1 - m_2^2}{2m_2} = 1,166;$$

$$\beta_3 = m_1 = 0,973; \quad \beta_4 = m_1 + m_2 = 1,82;$$

$$L_1 = \alpha_1 L = 92,5 \text{ мГн}; \quad L_2 = \alpha_2 L = 80,9 \text{ мГн};$$

$$C_1 = \beta_1 C = 3070 \text{ пФ}; \quad C_2 = \beta_2 C = 17,1 \cdot 10^3 \text{ пФ};$$

$$C_3 = \beta_3 C = 103 \cdot 10^3 \text{ пФ}; \quad C_4 = \beta_4 C = 194 \cdot 10^3 \text{ пФ}.$$

Частоты бесконечного затухания:

$$f_{\infty 1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = x_{\infty 1} f_1 = 9670 \text{ гц};$$

$$f_{\infty 2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = x_{\infty 2} f_1 = 4274 \text{ гц}.$$

Определим минимальную добротность элементов, необходимую для реализации характеристики фильтра в полосе пропускания.

В соответствии с техническими требованиями неравномерность частотной характеристики фильтра в полосе пропускания не должна превышать 0,345 *нп*. Так как затухание, определяемое несогласованностью фильтра, может достигать 0,09 *нп*, то затухание, обусловленное потерями на частоте f_{e1} , должно быть не более 0,255 *нп*. Пользуясь выражениями (62) и (64) и рис. 16, легко определить минимальную добротность, при которой можно получить такое затухание:

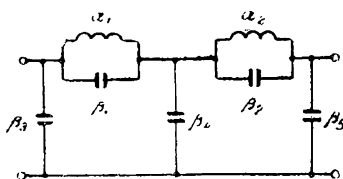


Рис. 20. Схема ФНЧ.

$$b_{\pi} = \frac{1}{Q} \frac{b_{\text{нпн}} + 0,69}{2} d_{\text{нч}} = 3,7 \frac{1}{Q} d_{\text{нч}};$$

$$\mu = \frac{f_{e1}}{f_e} = 0,5.$$

По кривым на рис. 16 при $\mu = 0,5$ и $K = 0,56$ находим:

$$d_{\text{нч}} = 1,5.$$

Подставляя значения $d_{\text{нч}} = 1,5$ и $b_{\pi} \leq 0,255$ в (62), получаем:

$$Q \geq 22.$$

Полагая, что потери в фильтре в основном определяются потерями в катушках индуктивности, последние следует сконструировать таким образом, чтобы добротность их на частоте 2000 *гц* была не менее 22.

13. РАСЧЕТ ФИЛЬТРА ВЕРХНИХ ЧАСТОТ

Рассчитать фильтр верхних частот по следующим техническим требованиям:

а) Полоса эффективно передаваемых частот от 4 000 гц и выше. Амплитудные искажения в полосе пропускания не должны превышать 0,2 неп.

б) В полосе задерживания 0—3 000 гц рабочее затухание должно быть не менее 2,3 неп.

в) На входе фильтра включен генератор с внутренним сопротивлением $R_1 = 1\,000\text{ ом}$; сопротивление нагрузки фильтра R_2 должно быть выбрано расчетным путем.

1. Выбор класса фильтра по характеристическому сопротивлению

Проектируем фильтр 1-го класса по характеристическому сопротивлению. При этом допустимые амплитудные искажения вследствие несогласованности не должны быть больше 0,1 неп. Воспользовавшись результатами расчета из предыдущего примера по формулам (38), (39) и (41)—(43), берем значения коэффициента использования полосы пропускания

$$K_1 = 0,906$$

и затухания несогласованности

$$b_{\text{н.мин}} = 1,6 \text{ неп.}$$

Для фильтров верхних частот из табл. 1

$$K_1 = \frac{f_1}{f_{a1}},$$

откуда частота среза фильтра

$$f_1 = K_1 f_{a1} = 0,906 \cdot 4\,000 = 3\,624 \text{ гц.}$$

Следовательно, класс фильтра по сопротивлению выбран правильно.

2. Выбор класса фильтра по затуханию

Коэффициент использования полосы задерживания фильтра верхних частот (по табл. 1) [см. (48)].

$$K = \frac{f_a}{f_1} = \frac{3\,000}{3\,624} = 0,828,$$

откуда

$$b_0 = \ln \frac{1 + \sqrt{1 - K^2}}{1 - \sqrt{1 - K^2}} = 1,942.$$

Класс фильтра по затуханию [см. (45, 47)].

$$N \geq \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{b_0 + 0,69} = 1,4,$$

где

$$b_{\text{мин}} = b_p + 0,69 = 3 \text{ неп.}$$

Следовательно, необходимо взять 1,5 звена фильтра верхних частот. При этом представляется возможность несколько увеличить коэффициент использования полосы задерживания K за счет уменьшения коэффициента использования полосы пропускания K_1 .

Определим наибольшее значение коэффициента использования полосы задерживания, при котором 1,5 звена обеспечат рабочее затухание, равное 2,3 неп.

Из выражения (47)

$$b_0 = \frac{b_{\text{мин}} - (N - 1) \cdot 0,69}{N} = 1,77.$$

Из выражения (48)

$$K = \sqrt{1 - \left(\frac{e^{b_0} - 1}{e^{b_0} + 1} \right)^4} = 0,86.$$

Из табл. 3 при $K = 0,86$ и $N = 1,5$:

$$\begin{aligned} m_1 &= 1,0; & x_{\infty 1} &= \infty; \\ m_2 &= 0,604; & x_{\infty 2} &= 1,255. \end{aligned}$$

Здесь $x_{\infty 1}$ и $x_{\infty 2}$ — нормированные частоты бесконечного затухания фильтра-проготипа. Значения нормированных частот бесконечного затухания проектируемого фильтра ВЧ $x'_{\infty 1}$ и $x'_{\infty 2}$ могут быть легко определены по формулам табл. 1:

$$\begin{aligned} x'_{\infty 1} &= \frac{1}{x_{\infty 1}} = 0; \\ x'_{\infty 2} &= \frac{1}{x_{\infty 2}} = 0,7968. \end{aligned}$$

3. Выбор схемы и расчет элементов

Возьмем одно звено типа m класса 1A1в и одно полувзвено типа K . Схема фильтра представлена на рис. 21.

Значения элементов схемы можно определить [см. (53)] пользуясь данными табл. 11.

$$\rho_1 = \frac{e^{b_{н.мин}} - 1}{e^{b_{н.мин}} + 1} = \frac{e^{1,6} - 1}{e^{1,6} + 1} = 0,663;$$

$$R_0 = \frac{R_{н1}}{\rho_1} = \frac{1000}{0,663} = 1510 \text{ ом};$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2m_2} = 0,828; \alpha_2 = 1,0;$$

$$\beta_1 = \frac{2m_2}{1 - m_2^2} = 1,90; \beta_2 = \frac{1}{m_2} = 1,66;$$

$$\beta_3 = \frac{\frac{1}{m_2}}{1 + \frac{1}{m_2}} = 0,623;$$

$$L = \frac{R_0}{2\pi f_1} = 66,3 \text{ мГн};$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_1 R_0} = 29,1 \cdot 10^3 \text{ пФ};$$

$$L_1 = \alpha_1 L = 54,8 \text{ мГн};$$

$$L_2 = \alpha_2 L = 66,3 \text{ мГн};$$

$$C_1 = \beta_1 C = 55,4 \cdot 10^3 \text{ пФ};$$

$$C_2 = \beta_2 C = 48,2 \cdot 10^3 \text{ пФ};$$

$$C_3 = \beta_3 C = 18,2 \cdot 10^3 \text{ пФ}.$$

Определим оптимальное значение нагрузочного сопротивления со стороны выходных зажимов фильтра [см. (55)]:

$$R_{н2} = \frac{R_{н1}}{\rho_1^2} = 2270 \text{ ом}.$$

Частота бесконечного затухания

$$f_{\infty 2} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = x'_{\infty 2} f_1 = 2890 \text{ Гц}.$$

Определим минимальную добротность катушек индуктивности, при которой реализуются требования к характеристике фильтра в полосе пропускания.

Так как неравномерность частотной характеристики, определяемая несогласованностью фильтра, может достигать 0,1 *неп*, то для обеспечения требуемой величины неравномерности 0,2 *неп* амплитудные искажения, обусловленные потерями, не должны превышать 0,1 *неп*.

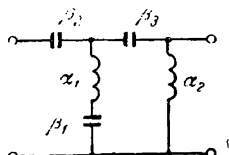


Рис. 21. Схема ФНЧ.

Затухание на крайней передаваемой частоте, обусловленное потерями [см. (65), (67)]

$$b_{\pi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_{\text{вч}} = 1,85 \frac{1}{Q} d_{\text{вч}} [\text{неп}]; \quad (65)$$

$$\mu = \frac{\dot{I}_a}{I_{a1}} = \frac{3\,000}{4\,000} = 0,75. \quad (67)$$

По кривым на рис. 17 при $\mu = 0,75$ и $K = 0,86$ определяем:

$$d_{\text{вч}} = 1,5.$$

Подставив $d_{\text{вч}} = 1,5$ и $b_{\pi} \leq 0,1$ в (65), получим:

$$Q \geq \frac{1,86 \cdot 1,5}{0,1} = 28.$$

Следовательно, катушки индуктивности должны быть спроектированы так, чтобы добротность их на частоте 4 000 *гц* была не менее 28.

14. РАСЧЕТ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА

Рассчитать полосовой фильтр по следующим техническим требованиям:

а) Полоса эффективно передаваемых частот 18—21 *кгц*; амплитудные искажения в полосе пропускания не должны превышать 0,1 *неп*.

б) В полосах задерживания фильтра на частотах 0—15 *кгц* и выше 24 *кгц* рабочее затухание должно быть не менее 2,8 *неп*.

в) Фильтр включается между генератором с внутренним сопротивлением 1 000 *ом* и нагрузочным сопротивлением, величина которого должна быть определена в результате расчета фильтра.

1. Выбор класса фильтра по сопротивлению

Задаемся допустимым колебанием затухания в полосе пропускания вследствие несогласованности 0,05 *неп*; тогда [см. (39), (38)]

$$b_0 = -\ln \sqrt{1 - e^{-2b_p}} = 1,2 \text{ неп.}$$

Принимаем:

$$b_{н.мин} = b_0 + 0,69 = 1,9 \text{ неп.}$$

Проектируем полосовой фильтр 2-го класса по характеристическому сопротивлению. Такое сопротивление имеет полосовой фильтр, полученный путем преобразования фильтра нижних частот (фильтра-прототипа) 1-го класса по сопротивлению.

Тогда [см. (41) — (43)]:

$$b_{он} = \frac{b_{н.мин} - (N-1) 0,69}{N} = 1,9 \text{ неп.},$$

где $N=1$ — класс по сопротивлению фильтра-прототипа.

Далее,

$$K_x = \frac{e^{b_{он}} - 1}{e^{b_{он}} + 1} = 0,740.$$

Коэффициент использования полосы пропускания фильтра-прототипа

$$K_1 = \sqrt{1 - K_x^4} = 0,840. \quad (41)$$

Крайние передаваемые частоты в полосовом фильтре:

$$f_{a1} = 18 \text{ кГц}; f_{e1} = 21 \text{ кГц.}$$

Среднюю частоту фильтра находим из выражения (57):

$$f_0 = \sqrt{f_{e1} f_{a1}} = 19,44 \text{ кГц.}$$

Следовательно,

$$\eta_{e1} = \frac{f_{e1}}{f_0} = 1,080; \eta_{a1} = \frac{f_0}{f_{a1}} = 0,92.$$

Из табл. 1 имеем:

$$K_1 = \frac{f_{e1} - f_{a1}}{f_2 - f_1} = \frac{\eta_{e1} - \eta_{a1}}{\eta_2 - \eta_1},$$

откуда

$$\eta_2 - \eta_1 = \frac{\eta_{e1} - \eta_{a1}}{K_1} = 0,184.$$

Следовательно [см. (61)],

$$n = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{1}{\eta_2 - \eta_1} = 5,440.$$

Из табл. 1 далее имеем:

$$\eta_1 = \sqrt{1 + \frac{1}{4n^2}} - \frac{1}{2n} = 0,913;$$

$$\eta_2 = \sqrt{1 + \frac{1}{4n^2}} + \frac{1}{2n} = 1,097,$$

откуда частоты среза:

$$f_1 = \eta_1 f_0 = 17,74 \text{ кГц} > 15 \text{ кГц};$$

$$f_2 = \eta_2 f_0 = 21,21 \text{ кГц} < 24 \text{ кГц}.$$

Следовательно, класс фильтра по сопротивлению выбран правильно.

2. Выбор класса фильтра по затуханию

Принимаем

$$f_e = 24 \text{ кГц} \text{ и } \eta_e = \frac{f_e}{f_0} = 1,234.$$

Тогда

$$\eta_a = \frac{1}{\eta_e} = 0,810$$

и

$$f_a = \eta_a f_0 = 15,75 \text{ кГц}.$$

Это означает, что требуемое затухание в полосе задерживания будет обеспечиваться, начиная с частоты не 15, а 15,75 кГц, т. е. с некоторым запасом по частоте.

Задаваться значением $f_a = 15 \text{ кГц}$ было бы неверно, так как в этом случае мы имели бы:

$$f_e = \frac{f_0^2}{f_a} = 25,2 \text{ кГц}.$$

и, таким образом, фильтр обеспечивал бы требуемое затухание, начиная с частоты 25,2 кГц, тогда как крайней задерживаемой частотой справа от полосы пропускания должна быть по условию частота 24 кГц.

Пользуясь данными табл. 1, определим коэффициент использования полосы задерживания фильтра-прототипа:

$$K_s' = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_e - \eta_a} = \frac{0,186}{0,4240} = 0,44;$$

тогда [см. (48)]

$$b_0 = \ln \frac{1 + \sqrt[4]{1 - K^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - K^2}} = 2,1 \text{ неп.}$$

Задаемся минимальным собственным затуханием 3,5 неп. Тогда класс по затуханию фильтра-прототипа

$$N \geq \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{b_0 + 0,69} = 1,5.$$

По табл. 3 при $N=1,5$ и $K=0,44$ определяем для фильтра прототипа:

$$\begin{aligned} m_1 &= 1; & x_{\infty 1} &= \infty; \\ m_2 &= 0,922; & x_{\infty 2} &= 2,590. \end{aligned}$$

Пользуясь данными табл. 1, можно определить нормированные частоты бесконечного затухания полосового фильтра:

$$\eta_{\infty 1,2} = \sqrt{1 + \frac{x_{\infty 1}^2}{4n^2}} \pm \frac{x_{\infty 1}}{2n},$$

откуда

$$\begin{aligned} \eta_{\infty 1} &= 0; & \eta_{\infty 2} &= \infty; \\ \eta_{\infty 3} &= 0,790; \\ \eta_{\infty 4} &= 1,266. \end{aligned}$$

3. Выбор схемы и расчет элементов

Для фильтра-прототипа мы получили класс по сопротивлению 1 и класс по затуханию 1,5. Следовательно, для полосового фильтра имеем класс по сопротивлению 2 и класс по затуханию 3.

Возьмем одно звено типа m класса 2В2п и одно полувзвено типа K класса 2А2п.

Схема фильтра представлена на рис. 22.

Со стороны зажимов 1-1' фильтр имеет характеристическое сопротивление класса 2В. Полосовой фильтр

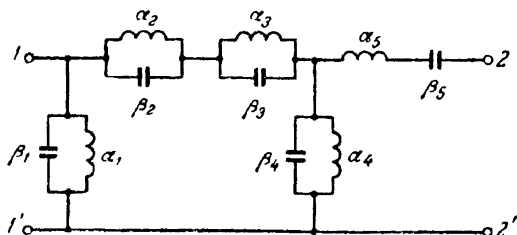


Рис. 22. Схема ПФ.

с таким сопротивлением получается путем преобразования фильтра-прототипа класса 1В по характеристическому сопротивлению.

Следовательно,

$$\rho_1 = \frac{e^{b_{\text{н.мн}}} + 1}{e^{b_{\text{н.мн}}} - 1} = 1,35;$$

$$R_0 = \frac{R_{\text{н1}}}{\rho_1} = 740 \text{ ом.}$$

Элементы фильтра можно определить, воспользовавшись данными табл. 12:

$$\alpha_1 = \frac{1}{m_2 n} = 0,1990;$$

$$\alpha_2 = \frac{2m_2}{1 - m_2^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1 + \eta_{\infty 4}^2} = 0,8686;$$

$$\alpha_3 = \frac{2m_2}{1 - m_2^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1 + \eta_{\infty 3}^2} = 1,392;$$

$$\alpha_4 = \frac{\frac{1}{m_2 n} \cdot \frac{1}{n}}{\frac{1}{m_2 n} + \frac{1}{n}} = 0,09555;$$

$$\alpha_5 = n = 5,440;$$

$$\beta_1 = m_2 n = 5,016;$$

$$\beta_2 = \frac{1 - m_2^2}{2m^2} n (1 + \eta_{\infty 3}^2) = 0,7180;$$

$$\beta_3 = \frac{1 - m_2^2}{2m_2} n (1 + \eta_{\infty 4}^2) = 1,151;$$

$$\beta_4 = m_2 n + n = 10,45;$$

$$\beta_5 = \frac{1}{n} = 0,1838;$$

$$L = \frac{R_0}{2\pi f_0} = 6,060 \text{ мГн};$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 R_0} = 1 \text{ } 107 \text{ нФ};$$

$$L_1 = \alpha_1 L = 1,990 \text{ мГн}; \quad L_2 = \alpha_2 L = 5,264 \text{ мГн};$$

$$L_3 = \alpha_3 L = 8,436 \text{ мГн}; \quad L_4 = \alpha_4 L = 0,5790 \text{ мГн};$$

$$L_5 = \alpha_5 L = 32,966 \text{ мГн};$$

$$C_1 = \beta_1 C = 55 \text{ } 510 \text{ нФ}; \quad C_2 = \beta_2 C = 7 \text{ } 947 \text{ нФ};$$

$$C_3 = \beta_3 C = 12 \text{ } 740 \text{ нФ}; \quad C_4 = \beta_4 C = 115 \text{ } 700 \text{ нФ};$$

$$C_5 = \beta_5 C = 2 \text{ } 034 \text{ нФ}.$$

Оптимальное нагрузочное сопротивление фильтра со стороны зажимов 2-2' [см. (55)]

$$R_{н2} = \frac{R_{н1}}{\rho_1^2} = 550 \text{ ом}.$$

Определим влияние потерь на характеристику фильтра в полосе пропускания. Неравномерность амплитудной характеристики фильтра в полосе пропускания должно быть не более 0,1 *нп*. Так как колебания затухания вследствие несогласованности фильтра могут составить 0,05 *нп*, то допустимая неравномерность, обусловленная потерями, также не должна превышать 0,05 *нп*.

Из выражений (68) и (70) для крайней передаваемой частоты f_{a1} и средней частоты f_0 имеем:

$$b_{\Pi f_{a1}} Q_1 = \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_{\Pi \Phi} \frac{f_0}{f_{e1} - f_{a1}} \left(1 + \frac{f_0^2}{f_{a1}^2} \right) = 29,4 d_{\Pi \Phi}$$

и

$$b_{\Pi f_0} Q_2 = \frac{b_{\text{мин}} + 0,69}{2} d_0 \frac{2f_0}{f_{e1} - f_{a1}} = 27,2 d_0.$$

Здесь Q_1 и Q_2 — добротности катушек индуктивности соответственно на частотах f_{a1} и f_0 .

Из выражения (68) видно, что на частоте f_{a1} затухание вследствие потерь несколько больше, нежели на частоте f_{e1} (конечно, при условии, что добротность на частоте f_{e1} не будет существенно меньше добротности на частоте f_{a1}). Поэтому неравномерность частотной характеристики фильтра в полосе пропускания вследствие потерь будет определяться разностью затуханий $b_{\Pi f_{a1}}$ и $b_{\Pi f_0}$.

Из (42) имеем:

$$\mu = \frac{f_{a1} - f_{e1}}{f_a - f_e}.$$

По кривым на рис. 18 при $\mu=0,36$ и $K=0,44$ определяем:

$$d_{\Pi\Phi}=0,65; \quad d_0=0,36.$$

Полагая далее, что $Q_1=Q_2=Q$, запишем:

$$\Delta b_{\Pi} Q = (b_{\Pi f_{a1}} - b_{\Pi f_0}) Q = 29,4 d_{\Pi\Phi} - 27,2 d_0 = 9,3,$$

откуда

$$\Delta b_{\Pi} \leq 0,05 \text{ неп.}, \text{ если } Q \geq 186.$$

Затухание фильтра на средней частоте при такой добротности составит:

$$b_{\Pi f_0} = \frac{27,2 d_0}{Q} \leq 0,052 \text{ неп.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. К о г а н С. С., Теория и расчет фильтров для установок дальней связи, Связьиздат, 1950.
 2. Б е л е ц к и й А. Ф., Теоретические основы электропроводной связи, ч. III, Связьиздат, 1959.
 3. А л ь б а ц М. Е., Справочник по расчету фильтров и линий задержек, Госэнергоиздат, 1963.
-

ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Таблица 8

№ п/п.	Параметр	НЧ	ВЧ	ПФ	ЗФ
1	Полоса пропускания	$0-f_{e1}$	$f_{a1}-\infty$	$f_{a1}-f_{e1}$	$0-f_{e1}$ $f_{a1}-\infty$
2	Полоса задерживания	$f_e-\infty$	$0-f_a$	$0-f_a$ $f_e-\infty$	f_e-f_a
3	Частота среза	f_1	f_1	$f_1: f_2$	$f_1: f_2$
4	Связь между граничными частотами	—	—	$f_1 f_2 = f_e f_a = f_{e1} f_{a1} = f_0^2$	$f_1 f_2 = f_e f_a = f_{e1} f_{a1} = f_0^2$
5	Коэффициент использования полосы задерживания K	$\frac{f_1}{f_e}$	$\frac{f_a}{f_1}$	$\frac{f_2-f_1}{f_e-f_a}$	$\frac{f_a-f_e}{f_2-f_1}$
6	Коэффициент использования полосы пропускания K_1	$\frac{f_{e1}}{f_1}$	$\frac{f_1}{f_{a1}}$	$\frac{f_{e1}-f_{a1}}{f_2-f_1}$	$\frac{f_2-f_1}{f_{a1}-f_{e1}}$
7	Нормированная частота	$x = \frac{f}{f_1}$	$x' = \frac{f}{f_1} = \frac{1}{\frac{1}{x}}$	$\eta = \frac{f}{f_0} = \sqrt{1 + \frac{x^2}{4n^2}} \pm \frac{x}{2n}$	$\eta' = \frac{f}{f_0} = \sqrt{1 + \frac{1}{4n^2 x^2}} \pm \frac{1}{2nx}$
8	Нормированная частота фильтра-прототипа	x	$x = \frac{1}{x'}$	$x = \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right) n$	$x = \frac{1}{\left(\eta' - \frac{1}{\eta'} \right) n}$

Таблица 2

K	N=1		N=2			
	m_1	$x_{\infty 1}$	m_1	$x_{\infty 1}$	m_2	$x_{\infty 2}$
0,30	0,97670	4,65944	0,99312	8,53818	0,96055	3,59574
0,32	0,97336	4,36092	0,99212	7,98152	0,95494	3,36936
0,34	0,96976	4,09704	0,99104	7,48876	0,94892	3,16952
0,36	0,96589	3,86196	0,98989	7,04918	0,94248	2,99176
0,38	0,96176	3,65116	0,98864	6,65436	0,93561	2,83262
0,40	0,95735	3,46096	0,98731	6,29754	0,92829	2,68926
0,42	0,95264	3,28842	0,98589	5,97322	0,92052	2,55948
0,44	0,94763	3,13108	0,98436	5,67694	0,91226	2,44138
0,46	0,94230	2,98698	0,98274	5,40498	0,90352	2,33346
0,48	0,93663	2,85446	0,98100	5,15424	0,89426	2,23442
0,50	0,93060	2,73206	0,97914	4,92212	0,88447	2,14318
0,52	0,92421	2,61862	0,97717	4,70638	0,87413	2,05888
0,54	0,91742	2,51312	0,97505	4,50516	0,86320	1,98072
0,56	0,91022	2,41468	0,97280	4,31682	0,85166	1,90806
0,58	0,90256	2,32256	0,97039	4,13992	0,83947	1,84026
0,60	0,89443	2,23606	0,96781	3,97326	0,82661	1,77690
0,62	0,88578	2,15466	0,96505	3,81572	0,81302	1,71752
0,64	0,87657	2,07782	0,96208	3,66636	0,79866	1,66172
0,66	0,86676	2,00508	0,95890	3,52426	0,78347	1,60918
0,68	0,85628	1,93606	0,95547	3,38870	0,76739	1,55962
0,70	0,84507	1,87036	0,95176	3,25892	0,75034	1,51274
0,71	0,83917	1,83866	0,94979	3,19598	0,74143	1,49026
0,72	0,83305	1,80768	0,94774	3,13424	0,73224	1,46834
0,73	0,82671	1,77736	0,94559	3,07364	0,72277	1,44698
0,74	0,82013	1,74770	0,94336	3,01408	0,71299	1,42618
0,75	0,81329	1,71862	0,94102	2,95548	0,70290	1,40588
0,76	0,80618	1,69012	0,93857	2,89780	0,69246	1,38608
0,77	0,79878	1,66216	0,93600	2,84092	0,68167	1,36676
0,78	0,79106	1,63470	0,93330	2,78478	0,67050	1,34788
0,79	0,78301	1,60670	0,93046	2,72934	0,65893	1,32942
0,80	0,77460	1,58114	0,92747	2,67446	0,64692	1,31138
0,81	0,76579	1,55498	0,92430	2,62010	0,63446	1,29374
0,82	0,75655	1,52920	0,92095	2,56616	0,62149	1,27646
0,83	0,74684	1,50373	0,91738	2,51254	0,60799	1,25954
0,84	0,73660	1,47858	0,91359	2,45914	0,59391	1,24196
0,85	0,72580	1,45368	0,90952	2,40586	0,57919	1,22670
0,86	0,71435	1,42900	0,90516	2,35256	0,56376	1,21074
0,87	0,70218	1,40448	0,90045	2,29910	0,54756	1,19508
0,88	0,68918	1,38010	0,89535	2,24534	0,53049	1,17968
0,89	0,67525	1,35576	0,88977	2,19106	0,51245	1,16452
0,90	0,66022	1,33142	0,88364	2,13600	0,49329	1,14960
0,91	0,64390	1,30700	0,87684	2,07992	0,47285	1,13488
0,92	0,62603	1,28238	0,86920	2,02238	0,45090	1,12036
0,93	0,60627	1,25746	0,86050	1,96288	0,42715	1,10598
0,94	0,58410	1,23202	0,85042	1,90074	0,40119	1,09170
0,95	0,55879	1,20582	0,83844	1,83488	0,37242	1,07752
0,96	0,52915	1,17852	0,82371	1,76362	0,33993	1,06332
0,97	0,49306	1,14942	0,80461	1,68406	0,30214	1,04904

Таблица 3

K	N=1,5		N=2,5			
	m_2	x_{∞_2}	m_2	x_{∞_2}	m_3	x_{∞_3}
0,30	0,96925	3,82670	0,98384	5,58502	0,95824	3,49712
0,32	0,96030	3,58456	0,98151	5,22446	0,95232	3,27752
0,34	0,95498	3,37070	0,97900	4,90554	0,94596	3,08368
0,36	0,94928	3,18038	0,97631	4,62126	0,93916	2,91130
0,38	0,94320	3,00992	0,97342	4,36614	0,93190	2,75700
0,40	0,93671	2,85630	0,97033	4,13580	0,92418	2,61808
0,42	0,92981	2,71714	0,96703	3,92666	0,91597	2,49230
0,44	0,92248	2,59042	0,96351	3,73582	0,90727	2,37790
0,46	0,91471	2,47456	0,95976	3,56086	0,89806	2,27238
0,48	0,90647	2,36816	0,95576	3,39974	0,88831	2,17752
0,50	0,89775	2,27008	0,95151	3,25080	0,87801	2,08926
0,52	0,88851	2,17936	0,94699	3,11260	0,86713	2,00770
0,54	0,87875	2,09516	0,94217	2,98388	0,85565	1,93214
0,56	0,86842	2,01678	0,93705	2,86364	0,84353	1,86192
0,58	0,85749	1,94364	0,93159	2,75092	0,83074	1,79646
0,60	0,84593	1,87516	0,92577	2,64494	0,81726	1,73528
0,62	0,83370	1,81088	0,91957	2,54498	0,80302	1,67798
0,64	0,82075	1,75042	0,91294	2,45046	0,78799	1,62422
0,66	0,80702	1,69342	0,90585	2,36078	0,77212	1,57362
0,68	0,79245	1,63952	0,89826	2,27546	0,75533	1,52592
0,70	0,77997	1,58846	0,89009	2,19406	0,73756	1,48086
0,71	0,76886	1,56392	0,88578	2,15468	0,72827	1,45924
0,72	0,76048	1,53998	0,88130	2,11616	0,71871	1,43822
0,73	0,75183	1,51664	0,87664	2,07838	0,70886	1,41772
0,74	0,74289	1,49386	0,87180	2,04136	0,69869	1,39778
0,75	0,73365	1,47160	0,86675	2,00502	0,68821	1,37834
0,76	0,72407	1,44986	0,86148	1,96930	0,67738	1,35938
0,77	0,71415	1,42860	0,85598	1,93420	0,66619	1,34088
0,78	0,70387	1,40778	0,85023	1,89966	0,65462	1,32282
0,79	0,69319	1,38742	0,84421	1,86562	0,64265	1,30520
0,80	0,68209	1,36748	0,83789	1,83202	0,63024	1,28798
0,81	0,67053	1,34792	0,83125	1,79886	0,61736	1,27116
0,82	0,65849	1,32874	0,82425	1,76608	0,60399	1,25472
0,83	0,64591	1,30992	0,81687	1,73362	0,59008	1,23862
0,84	0,63276	1,29142	0,80905	1,70142	0,57559	1,22288
0,85	0,61897	1,21322	0,80075	1,66946	0,56046	1,20748
0,86	0,60448	1,25530	0,79191	1,63762	0,54464	1,19236
0,87	0,58920	1,23766	0,78245	1,60586	0,52804	1,17756
0,88	0,57305	1,22022	0,77228	1,57412	0,51058	1,16302
0,89	0,55592	1,20302	0,76130	1,54226	0,49216	1,14876
0,90	0,53764	1,18600	0,74937	1,51022	0,47265	1,13476
0,91	0,51805	1,16912	0,73629	1,47782	0,45187	1,12098
0,92	0,49690	1,15234	0,72183	1,44492	0,42962	1,10742
0,93	0,47388	1,13560	0,70564	1,41130	0,40560	1,09404
0,94	0,44854	1,11886	0,68725	1,37944	0,37944	1,08082
0,95	0,42024	1,10204	0,66591	1,34042	0,35056	1,06776
0,96	0,38795	1,08498	0,64044	1,30206	0,31809	1,05478
0,97	0,34994	1,06748	0,60865	1,26034	0,28055	1,04186

При всех значениях K $m_1=1$, $x_{\infty_1}=\infty$

Таблица 4

K	N=3					
	m_1	x_{∞_1}	m_2	x_{∞_2}	m_3	x_{∞_3}
0,30	0,99685	12,60062	0,97670	4,65944	0,95696	3,44556
0,32	0,99639	11,77588	0,97335	4,36092	0,95085	3,22950
0,34	0,99558	11,04560	0,96976	4,09704	0,94430	3,03882
0,36	0,99536	10,39390	0,96589	3,86196	0,93730	2,86926
0,38	0,99479	9,80836	0,96176	3,65116	0,92983	2,71750
0,40	0,99418	9,27898	0,95735	3,46096	0,92188	2,58088
0,42	0,99352	8,79762	0,95264	3,28842	0,91344	2,45722
0,44	0,99282	8,35770	0,94763	3,13108	0,90450	2,34476
0,46	0,99206	7,95368	0,94229	2,98698	0,89502	2,24204
0,48	0,99126	7,58100	0,93663	2,85446	0,88500	2,14782
0,50	0,99040	7,23580	0,93060	2,73206	0,87442	2,06110
0,52	0,98949	6,91478	0,92421	2,61862	0,86324	1,98102
0,54	0,98851	6,61518	0,91742	2,51312	0,85145	1,90680
0,56	0,98746	6,33454	0,91022	2,41468	0,83901	1,83786
0,58	0,98634	5,07078	0,90256	2,32256	0,82590	1,77362
0,60	0,98514	5,82206	0,89443	2,23606	0,81207	1,71362
0,62	0,98385	5,58674	0,88578	2,15466	0,79748	1,65742
0,64	0,98246	5,36338	0,87657	2,07782	0,78209	1,60472
0,66	0,98097	4,15074	0,86676	2,00508	0,76584	1,55512
0,68	0,97936	4,94758	0,85628	1,93606	0,74866	1,50842
0,70	0,97762	4,75286	0,85451	1,87036	0,73049	1,46430
0,71	0,97669	4,65836	0,83917	1,83866	0,72101	1,44316
0,72	0,97572	4,56556	0,83305	1,80768	0,71124	1,42258
0,73	0,97471	4,47438	0,82671	1,77736	0,70118	1,40256
0,74	0,97365	4,38472	0,82013	1,74770	0,69081	1,38306
0,75	0,97254	4,29642	0,81329	1,71862	0,68012	1,36406
0,76	0,97137	4,20942	0,80618	1,69012	0,66908	1,34556
0,77	0,97015	4,12356	0,79878	1,66216	0,65768	1,32748
0,78	0,96886	4,03874	0,79106	1,63447	0,64589	1,30988
0,79	0,96750	3,95482	0,78301	1,60770	0,63370	1,29268
0,80	0,96607	3,87172	0,77460	1,58114	0,62107	1,27592
0,81	0,96455	3,78928	0,76579	1,55498	0,60798	1,25952
0,82	0,96293	3,70734	0,75655	1,52920	0,59440	1,24352
0,83	0,96121	3,62578	0,74684	1,50374	0,58027	1,22786
0,84	0,95938	3,54444	0,73660	1,47858	0,56556	1,21256
0,85	0,95740	3,46312	0,72580	1,45368	0,55022	1,19758
0,86	0,95528	3,38164	0,71435	1,42900	0,53418	1,18292
0,87	0,95297	3,29974	0,70218	1,40448	0,51738	1,16856
0,88	0,95046	3,21718	0,68918	1,38010	0,49973	1,15448
0,89	0,94771	3,13360	0,67525	1,35576	0,48112	1,14070
0,90	0,94467	3,04862	0,66022	1,33142	0,46142	1,12716
0,91	0,94128	2,96172	0,64390	1,30700	0,44048	1,11388
0,92	0,93744	2,87228	0,62603	1,28238	0,41807	1,10082
0,93	0,93303	2,77942	0,60627	1,25746	0,39394	1,08798
0,94	0,92788	2,68188	0,58410	1,23202	0,36769	1,07534
0,95	0,92170	2,57788	0,55879	1,20582	0,33880	1,06286
0,96	0,91398	2,46452	0,52915	1,17852	0,30635	1,05052
0,97	0,90379	2,33662	0,49306	1,14942	0,26898	1,03826

Таблица 5

K	N=3,5					
	m_2	x_{∞_2}	m_3	x_{∞_3}	m_4	x_{∞_4}
0,30	0,99116	7,53808	0,97159	4,22510	0,95617	3,41514
0,32	0,98988	7,04764	0,95590	3,95590	0,94996	3,20116
0,34	0,98850	6,61356	0,96315	3,71802	0,94329	3,01234
0,36	0,98702	6,22640	0,95847	3,50622	0,93616	2,84446
0,38	0,98543	5,87872	0,95346	3,31638	0,92857	2,69420
0,40	0,98372	5,56456	0,94811	3,14518	0,92048	2,55892
0,42	0,98189	5,27910	0,94241	2,98998	0,91190	2,43664
0,44	0,97994	5,01836	0,93635	2,84856	0,90280	2,32522
0,46	0,97786	4,77908	0,92992	2,71910	0,89316	2,22356
0,48	0,97564	4,55854	0,92308	2,60012	0,88298	2,13032
0,50	0,97327	4,35444	0,91584	2,49034	0,87222	2,04452
0,52	0,97075	4,16480	0,90815	2,38868	0,86087	1,96528
0,54	0,96805	3,98798	0,90000	2,29422	0,84889	1,89188
0,56	0,96517	3,82254	0,89137	2,20618	0,83626	1,82370
0,58	0,96210	3,66722	0,88222	2,12388	0,82294	1,76018
0,60	0,95882	3,52096	0,87252	2,04672	0,80890	1,70086
0,62	0,95531	3,38274	0,86222	1,97418	0,79410	1,64532
0,64	0,95154	3,25176	0,85128	1,90582	0,77849	1,59322
0,66	0,94750	3,12726	0,83965	1,84120	0,76201	1,54426
0,68	0,94314	3,00852	0,82727	1,77998	0,74460	1,49812
0,70	0,93844	2,89496	0,81407	1,72186	0,72620	1,45458
0,71	0,93595	2,83988	0,80713	1,69386	0,71659	1,43370
0,72	0,93336	2,78592	0,79996	1,66650	0,70670	1,41342
0,73	0,93065	2,73296	0,79253	1,63970	0,69652	1,39366
0,74	0,92783	2,68092	0,78483	1,61366	0,68602	1,37442
0,75	0,92488	2,62976	0,77685	1,58812	0,67520	1,35568
0,76	0,92179	2,57942	0,76857	1,56308	0,66403	1,33742
0,77	0,91856	2,52978	0,75997	1,53858	0,65250	1,31964
0,78	0,91516	2,48086	0,75103	1,51454	0,64059	1,30228
0,79	0,91159	2,43254	0,74172	1,49096	0,62827	1,28536
0,80	0,90783	2,38476	0,73201	1,46780	0,61552	1,26884
0,81	0,90387	2,33746	0,72188	1,44506	0,60230	1,25270
0,82	0,89967	2,29056	0,71128	1,42266	0,58858	1,23696
0,83	0,89521	2,24398	0,70017	1,40062	0,57433	1,22156
0,84	0,89047	2,19762	0,68851	1,37888	0,55949	1,20692
0,85	0,88541	2,15140	0,67623	1,35742	0,54402	1,19178
0,86	0,87998	2,10522	0,66327	1,33622	0,52786	1,17740
0,87	0,87414	2,05896	0,64955	1,31524	0,51094	1,16332
0,88	0,86781	2,01248	0,63497	1,29442	0,49317	1,14952
0,89	0,86092	1,96562	0,61940	1,27376	0,47445	1,13600
0,90	0,85336	1,91818	0,60270	1,25318	0,45465	1,12276
0,91	0,84499	1,86992	0,58468	1,23266	0,43361	1,10976
0,92	0,83563	1,82052	0,56508	1,21206	0,41112	1,09700
0,93	0,82501	1,76956	0,54355	1,19136	0,38692	1,08448
0,94	0,81276	1,71646	0,51962	1,17042	0,36063	1,07216
0,95	0,79828	1,66036	0,49258	1,14908	0,33170	1,06002
0,96	0,78060	1,59992	0,46129	1,12708	0,29932	1,04806
0,97	0,75787	1,53280	0,42379	1,10406	0,26206	1,03622

При всех значениях K $m_1=1$, $x_{\infty_1}=\infty$.

K	N=4							
	m_1	x_{Co_1}	m_2	x_{Co_2}	m_3	x_{Co_3}	m_4	x_{Co_4}
0,75	0,98429	5,66440	0,88001	2,10548	0,75162	1,51608	0,67199	1,35034
0,76	0,98362	5,54812	0,87523	2,06734	0,74258	1,49308	0,66074	1,33226
0,77	0,98292	5,43336	0,87023	2,02982	0,73319	1,47056	0,64913	1,31462
0,78	0,98217	5,31994	0,86499	1,99288	0,72345	1,44848	0,63714	1,29744
0,79	0,98139	5,20770	0,85991	1,95648	0,71332	1,42686	0,62473	1,28068
0,80	0,98056	5,09648	0,85375	1,92054	0,70279	1,40568	0,61189	1,26432
0,81	0,97968	4,98608	0,84769	1,88502	0,69180	1,38488	0,59859	1,24836
0,82	0,97875	4,87632	0,84129	1,84988	0,68034	1,36446	0,58479	1,23276
0,83	0,97775	4,76702	0,83454	1,81506	0,66835	1,34436	0,57046	1,21754
0,84	0,97668	4,65794	0,82738	1,78050	0,65579	1,32460	0,55554	1,20266
0,85	0,97554	4,54882	0,81977	1,74616	0,64260	1,30514	0,53999	1,18812
0,86	0,97430	4,43942	0,81165	1,71192	0,62871	1,28506	0,52375	1,17288
0,87	0,97296	4,32936	0,80296	1,67774	0,61405	1,26698	0,50676	1,15998
0,88	0,97149	4,21832	0,79359	1,64352	0,59851	1,24826	0,48891	1,14636
0,89	0,96989	4,10580	0,78346	1,60916	0,58198	1,22972	0,47012	1,13302
0,90	0,96811	3,99130	0,77242	1,57454	0,56431	1,21130	0,45025	1,11996
0,91	0,96611	3,87408	0,76030	1,53948	0,54532	1,19298	0,42915	1,10714
0,92	0,96385	3,75326	0,74687	1,50382	0,52475	1,17474	0,40662	1,09458
0,93	0,96125	3,62762	0,73178	1,46726	0,50228	1,15646	0,38237	1,08224
0,94	0,95820	3,49542	0,71458	1,42948	0,47745	1,13810	0,35606	1,07014
0,95	0,95452	3,35416	0,69455	1,38996	0,44957	1,11952	0,32713	1,05822
0,96	0,94991	3,19972	0,67061	1,34788	0,41759	1,10056	0,29477	1,04690
0,97	0,94377	3,02488	0,64032	1,30190	0,37966	1,08094	0,25759	1,03492

Таблица 7

		N=4,5						
K	m_2	x_{Co_2}	m_3	x_{Co_3}	m_4	x_{Co_4}	m_5	x_{Co_5}
0,30	0,99450	9,54664	0,98070	5,11526	0,96525	3,82670	0,95530	3,38238
0,32	0,99370	8,99332	0,97793	4,78612	0,96030	3,58456	0,94896	3,17068
0,34	0,99284	8,37152	0,97494	4,49508	0,95498	3,37070	0,94217	2,98386
0,36	0,99191	7,87918	0,97173	4,23572	0,94928	3,18038	0,93491	2,81776
0,38	0,99092	7,43692	0,96829	4,00304	0,94320	3,00992	0,92716	2,66912
0,40	0,98985	7,03716	0,96462	3,79302	0,93671	2,85630	0,91893	2,53534
0,42	0,98871	6,67378	0,96070	3,60240	0,92981	2,71714	0,91018	2,41428
0,44	0,98749	6,34176	0,95652	3,42852	0,92248	2,59042	0,90091	2,30480
0,46	0,98619	6,03692	0,95207	3,26918	0,91471	2,47456	0,89110	2,20366
0,48	0,98479	5,75582	0,94733	3,12252	0,90649	2,36816	0,88074	2,11148
0,50	0,98330	5,49556	0,94230	2,98700	0,89775	2,27008	0,86979	2,02668
0,52	0,98172	5,25360	0,93694	2,86132	0,88851	2,17936	0,85824	1,94836
0,54	0,98002	5,02786	0,93125	2,74436	0,87875	2,09516	0,84606	1,87586
0,56	0,97821	4,81652	0,92520	2,63512	0,86842	2,01678	0,83321	1,80848
0,58	0,97627	4,61798	0,91876	2,53280	0,85749	1,94364	0,81968	1,74572
0,60	0,97420	4,43086	0,91191	2,43666	0,84593	1,87516	0,80541	1,68716
0,62	0,97198	4,25392	0,90461	2,34608	0,83370	1,81088	0,79037	1,63232
0,64	0,96959	4,08608	0,89682	2,26048	0,82075	1,75043	0,77452	1,58092
0,66	0,96702	3,92640	0,88851	2,17936	0,80702	1,69342	0,75779	1,53258
0,68	0,96426	3,77396	0,87962	2,10224	0,79245	1,63952	0,74013	1,48708
0,70	0,96126	3,62794	0,87008	2,02876	0,77697	1,58846	0,72146	1,44414
0,71	0,95967	3,55712	0,86505	1,99326	0,76886	1,56392	0,71172	1,42356
0,72	0,95801	3,48762	0,85982	1,95852	0,76048	1,53998	0,70170	1,40356
0,73	0,95628	3,41936	0,85440	1,92452	0,75183	1,51064	0,69138	1,38410
0,74	0,95447	3,35228	0,84877	1,89118	0,74289	1,49386	0,68075	1,36516

K	N=4,5							
	m_3	x_{co_2}	m_3	x_{co_3}	m_4	x_{co_4}	m_5	x_{co_5}
0,75	0,95258	3,28626	0,84290	1,85850	0,73365	1,47160	0,66979	1,34670
0,76	0,95059	3,22122	0,83679	1,82642	0,72407	1,44986	0,65848	1,32874
0,77	0,94851	3,15710	0,83042	1,79492	0,71415	1,42860	0,64682	1,31122
0,78	0,94632	3,09378	0,82377	1,76392	0,70387	1,40778	0,63476	1,29416
0,79	0,94402	3,03120	0,81682	1,73342	0,69319	1,38742	0,62230	1,27752
0,80	0,94158	2,96926	0,80954	1,70338	0,68205	1,36748	0,60941	1,26126
0,81	0,93901	2,90786	0,80189	1,67374	0,67053	1,34792	0,59605	1,24542
0,82	0,93628	2,84688	0,79386	1,64448	0,65849	1,32874	0,58219	1,22992
0,83	0,93337	2,78626	0,78540	1,61554	0,64591	1,30992	0,56780	1,21482
0,84	0,93028	2,72584	0,77646	1,58686	0,63276	1,29142	0,55283	1,20006
0,85	0,92696	2,66552	0,76698	1,55844	0,61897	1,27322	0,53723	1,18562
0,86	0,92339	2,60512	0,75692	1,53020	0,60448	1,25330	0,52093	1,17152
0,87	0,91954	2,54452	0,74618	1,50248	0,58920	1,23766	0,50388	1,15772
0,88	0,91535	2,48350	0,73468	1,47402	0,57305	1,22022	0,48599	1,14422
0,89	0,91077	2,42186	0,72229	1,44596	0,55592	1,20302	0,46715	1,13098
0,90	0,90573	2,35926	0,70888	1,41776	0,53764	1,18600	0,44724	1,11806
0,91	0,90011	2,29538	0,69424	1,38938	0,51805	1,16912	0,42610	1,10536
0,92	0,89380	2,22980	0,67812	1,36064	0,49690	1,15234	0,40353	1,09294
0,93	0,88959	2,16188	0,66017	1,33136	0,47388	1,13550	0,37926	1,08074
0,94	0,87820	2,09078	0,63990	1,30132	0,44854	1,11886	0,35293	1,06878
0,95	0,86820	2,01526	0,61656	1,27016	0,42024	1,10204	0,32399	1,05702
0,96	0,85584	1,93332	0,58893	1,23736	0,38795	1,08498	0,29165	1,04546
0,97	0,83971	1,84148	0,55484	1,20198	0,34994	1,06748	0,25453	1,03406

При всех значениях K $m_1=1$, $x_{\text{co}_1}=\infty$.

N=5

K	m_1	x_{001}	m_2	x_{001}	m_3	x_{003}	m_4	x_{00}	m_5	x_{003}
0,30	0,99885	20,82862	0,99033	7,20726	0,97670	4,65944	0,96326	3,72322	0,95504	3,37298
0,32	0,99868	19,46058	0,98893	6,73876	0,97335	4,36092	0,95802	3,48814	0,94867	3,16190
0,34	0,99850	18,25082	0,98742	6,32412	0,96976	4,09704	0,95241	3,28054	0,84184	2,97566
0,36	0,99830	17,17106	0,98580	5,95434	0,96589	3,86196	0,94639	3,09586	0,93454	2,81008
0,38	0,99809	16,20072	0,98405	5,62228	0,96176	3,65116	0,93997	2,93044	0,92675	2,66192
0,40	0,99787	15,32326	0,98219	5,32226	0,95735	3,46096	0,93313	2,78142	0,91847	2,52856
0,42	0,99763	14,52528	0,98020	5,04966	0,95264	3,28842	0,92586	2,64644	0,90968	2,40788
0,44	0,99737	13,79576	0,97806	4,80072	0,94763	3,13108	0,91814	2,52358	0,90037	2,29816
0,46	0,99709	13,12564	0,97579	4,57228	0,94229	2,98698	0,90995	2,41126	0,89051	2,19796
0,48	0,99680	12,50782	0,97236	4,36176	0,93663	2,85446	0,90127	2,30816	0,88009	2,10608
0,50	0,99648	11,93442	0,97078	4,16696	0,93060	2,73206	0,89210	2,21314	0,86908	2,02156
0,52	0,99615	11,40154	0,96802	3,98598	0,92421	2,61862	0,88239	2,12528	0,85747	1,94352
0,54	0,99579	10,90396	0,96508	3,81726	0,91742	2,51312	0,87212	2,04378	0,84523	1,87124
0,56	0,99540	10,43714	0,96194	3,65942	0,91022	2,41468	0,86127	1,96796	0,83232	1,80410
0,58	0,99499	9,99936	0,95859	3,51126	0,90256	2,32256	0,84981	1,89722	0,81872	1,74158
0,60	0,99454	9,58582	0,95501	3,37176	0,89443	2,23608	0,83769	1,83102	0,80439	1,68322
0,62	0,99407	9,11438	0,95118	3,23998	0,88578	2,15466	0,82487	1,76892	0,79928	1,62858
0,64	0,99356	8,62268	0,94707	3,11512	0,87657	2,07782	0,81131	1,71054	0,77336	1,57736
0,66	0,99300	8,46856	0,94267	2,99646	0,86678	2,00508	0,79696	1,65552	0,75656	1,52922
0,68	0,99241	8,13004	0,93793	2,88332	0,85628	1,93606	0,78173	1,60356	0,73882	1,48390
0,70	0,99176	7,80536	0,93282	2,77512	0,84507	1,87036	0,76557	1,55436	0,70557	1,44114
0,71	0,99141	7,64765	0,93011	2,72272	0,83917	1,83866	0,75712	1,53074	0,71030	1,42066
0,72	0,99105	7,49280	0,92729	2,67132	0,83305	1,80768	0,74839	1,50772	0,70024	1,40074
0,73	0,99068	7,34060	0,92435	2,62088	0,82671	1,77736	0,73938	1,48526	0,63988	1,38136
0,74	0,99028	7,19082	0,92128	2,57136	0,82013	1,74770	0,73008	1,46336	0,67921	1,36248

K	N=5									
	m_1	$x_{\infty 1}$	m_2	$x_{\infty 2}$	m_3	$x_{\infty 3}$	m_4	$x_{\infty 4}$	m_5	$x_{\infty 5}$
0,75	0,98987	7,04328	0,91808	2,52268	0,81329	1,71862	0,72046	1,44198	0,66821	1,34414
0,76	0,98944	6,89780	0,91473	2,47478	0,80618	1,69012	0,71051	1,42108	0,65686	1,32624
0,77	0,98898	6,75416	0,91121	2,42758	0,79878	1,66216	0,70021	1,40068	0,64515	1,30882
0,78	0,98850	6,61218	0,90753	2,38106	0,79106	1,63470	0,68954	1,38054	0,63306	1,29182
0,79	0,98799	6,47168	0,90366	2,33512	0,78301	1,60770	0,67847	1,36124	0,62056	1,27526
0,80	0,98745	6,33238	0,89959	2,28970	0,77460	1,58114	0,66697	1,34214	0,60762	1,25909
0,81	0,98688	6,19412	0,89529	2,24476	0,76579	1,55498	0,65502	1,32342	0,59423	1,24332
0,82	0,98628	6,05664	0,89074	2,20020	0,75655	1,52920	0,64257	1,30510	0,58033	1,22792
0,83	0,98563	5,91968	0,88592	2,15596	0,74684	1,50374	0,62958	1,28712	0,56590	1,21288
0,84	0,98494	5,78294	0,88080	2,11196	0,73660	1,47858	0,61602	1,26946	0,55089	1,19822
0,85	0,98419	5,64614	0,87533	2,06812	0,72580	1,45368	0,60181	1,25214	0,53524	1,18386
0,86	0,98339	5,50892	0,86947	2,02432	0,71435	1,42900	0,58691	1,23510	0,51892	1,16982
0,87	0,98251	5,37086	0,86316	1,98046	0,70218	1,40448	0,57122	1,21832	0,50183	1,15612
0,88	0,98156	5,23148	0,85634	1,93642	0,68918	1,38010	0,55466	1,20180	0,48390	1,14270
0,89	0,98051	5,09022	0,84892	1,89206	0,67525	1,35576	0,53711	1,18552	0,46502	1,12956
0,90	0,97935	4,94636	0,84078	1,84716	0,66022	1,33142	0,51843	1,16942	0,44508	1,11670
0,91	0,97805	4,79904	0,83179	1,80154	0,64390	1,30700	0,49845	1,15352	0,42391	1,10412
0,92	0,97657	4,64708	0,82175	1,75486	0,62603	1,28238	0,47693	1,13774	0,40132	1,09178
0,93	0,97487	4,48894	0,81038	1,70676	0,60627	1,25746	0,45357	1,12206	0,37703	1,07968
0,94	0,97287	4,32242	0,79728	1,55668	0,58410	1,23102	0,42792	1,10642	0,35069	1,06782
0,95	0,97045	4,14428	0,78183	1,60388	0,55879	1,20982	0,39938	1,09076	0,32176	1,05616
0,96	0,96741	3,94930	0,76302	1,54708	0,52915	1,17852	0,36696	1,07498	0,28943	1,04472
0,97	0,96336	3,72816	0,73893	1,48416	0,49306	1,14942	0,32900	1,05896	0,25235	1,03346

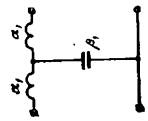
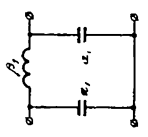
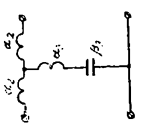
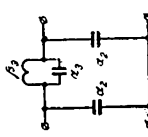
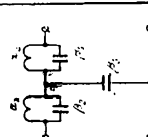
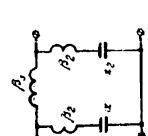
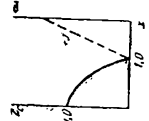
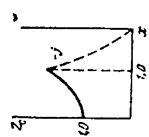
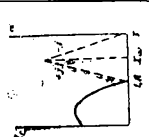
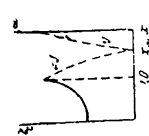
Таблица 9

K	N=5,5									
	m_2	$x_{\infty 2}$	m_1	$x_{\infty 3}$	m_4	$x_{\infty 1}$	m_5	$x_{\infty 5}$	m_6	$x_{\infty 6}$
0,30	0,99626	11,57920	0,98631	6,06444	0,97343	4,36682	0,96173	3,64984	0,95485	3,36604
0,32	0,99572	10,82178	0,98434	5,67192	0,96962	4,08804	0,95629	3,41976	0,94845	3,15544
0,34	0,99514	10,15112	0,98221	5,32462	0,96553	3,84166	0,95045	3,21662	0,94160	2,96962
0,36	0,99451	9,55268	0,97992	5,01498	0,96114	3,62224	0,94419	3,03592	0,93426	2,80442
0,38	0,99383	9,01502	0,97746	4,73706	0,95644	3,42554	0,93752	2,87412	0,92645	2,65660
0,40	0,99310	8,52896	0,97484	4,48606	0,95143	3,24812	0,93041	2,72836	0,91814	2,52356
0,42	0,99233	8,08702	0,97203	4,25812	0,94609	3,08726	0,92285	2,59636	0,90931	2,40316
0,44	0,99149	7,68312	0,96904	4,05002	0,94040	2,94062	0,91483	2,47624	0,89996	2,29370
0,46	0,99060	7,31224	0,96584	3,85918	0,93436	2,80638	0,90633	2,36644	0,89006	2,19374
0,48	0,98965	6,97016	0,96244	3,68342	0,92794	2,68296	0,89733	2,26568	0,87960	2,10210
0,50	0,98864	6,65330	0,95882	3,52086	0,92113	2,56906	0,88780	2,17286	0,86855	2,01778
0,52	0,98756	6,35870	0,95496	3,36996	0,91392	2,46354	0,87773	2,08704	0,85690	1,93992
0,54	0,98640	6,08376	0,95085	3,22936	0,90625	2,36546	0,86709	2,00746	0,84461	1,86784
0,56	0,98516	5,82626	0,94647	3,09792	0,89812	2,27402	0,85586	1,93344	0,83166	1,80088
0,58	0,98384	5,58426	0,94180	2,97466	0,88950	2,18848	0,84398	1,86440	0,81801	1,73852
0,60	0,98242	5,35608	0,93682	2,85870	0,88035	2,10828	0,83144	1,79982	0,80363	1,68032
0,62	0,98089	5,14026	0,93150	2,74928	0,87064	2,03282	0,81819	1,73928	0,78948	1,62586
0,64	0,97926	4,93544	0,92582	2,64572	0,86031	1,96168	0,80418	1,68238	0,77250	1,57476
0,66	0,97750	4,74046	0,91973	2,54738	0,84932	1,89440	0,78935	1,62800	0,75564	1,52676
0,68	0,97560	4,55420	0,91319	2,45378	0,83761	1,83062	0,77364	1,57822	0,73785	1,48156
0,70	0,97354	4,37512	0,90616	2,36438	0,82511	1,77000	0,75698	1,53036	0,71905	1,43894
0,71	0,97244	4,28910	0,90244	2,32112	0,81854	1,74078	0,74826	1,50738	0,70925	1,41852
0,72	0,97130	4,20408	0,89857	2,27874	0,81173	1,71224	0,73927	1,48498	0,69915	1,39866
0,73	0,97010	4,12054	0,89454	2,23720	0,80468	1,68436	0,73000	1,46318	0,68877	1,37936
0,74	0,96886	4,03838	0,89035	2,19644	0,79738	1,65706	0,72043	1,44190	0,67806	1,36054

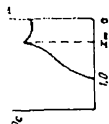
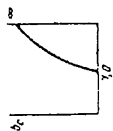
K	N=5,5									
	m_s	$x_{\infty 2}$	m_0	$x_{\infty 3}$	m_1	$x_{\infty 4}$	m_5	$x_{\infty 5}$	m_6	$x_{\infty 6}$
0,75	0,96755	3,95754	0,88597	2,15640	0,78980	1,63036	0,71054	1,42114	0,66704	1,34224
0,76	0,96618	3,87784	0,88141	2,11706	0,78192	1,60418	0,70031	1,40088	0,65566	1,32442
0,77	0,96474	3,79922	0,87663	2,07832	0,77374	1,57854	0,68973	1,38110	0,64392	1,30704
0,78	0,96322	3,72156	0,87164	2,04018	0,76522	1,55336	0,67878	1,36176	0,63180	1,29010
0,79	0,96163	3,64476	0,86640	2,00258	0,75635	1,52866	0,66742	1,34286	0,61927	1,27360
0,80	0,95994	3,56868	0,86089	1,96546	0,74709	1,50438	0,65563	1,32436	0,60630	1,25748
0,81	0,95815	3,49324	0,85510	1,92876	0,73741	1,48052	0,64339	1,30626	0,59288	1,24178
0,82	0,95625	3,41828	0,84899	1,89246	0,72728	1,45700	0,63064	1,28854	0,57895	1,22646
0,83	0,95423	3,34368	0,84252	1,85646	0,71665	1,43384	0,61736	1,27116	0,56449	1,21148
0,84	0,95207	3,26930	0,83567	1,82072	0,70548	1,41098	0,60350	1,25414	0,54945	1,19686
0,85	0,94976	3,19498	0,82838	1,78510	0,69370	1,38838	0,58900	1,23742	0,53378	1,18256
0,86	0,94726	3,12048	0,82059	1,74976	0,68125	1,36604	0,57379	1,22100	0,51742	1,16860
0,87	0,94456	3,04568	0,81225	1,71436	0,66806	1,34388	0,55781	1,20486	0,50030	1,15494
0,88	0,94162	2,97026	0,80326	1,67892	0,65401	1,32190	0,54096	1,18898	0,48235	1,14158
0,89	0,93840	2,89396	0,79353	1,64328	0,63899	1,30004	0,52312	1,17336	0,46345	1,12852
0,90	0,93484	2,81642	0,78291	1,60738	0,62285	1,27822	0,50416	1,15792	0,44349	1,11572
0,91	0,93087	2,73716	0,77124	1,57100	0,60539	1,25638	0,48391	1,14270	0,42230	1,10320
0,92	0,92639	2,65564	0,75829	1,53394	0,58635	1,23448	0,46214	1,12764	0,39969	1,09092
0,93	0,92126	2,57102	0,74373	1,49596	0,56539	1,21238	0,43855	1,11272	0,37539	1,07890
0,94	0,91526	2,38226	0,72711	1,45662	0,54202	1,18996	0,41272	1,09786	0,34903	1,06712
0,95	0,90807	2,38768	0,70771	1,41542	0,51552	1,16702	0,38404	1,08306	0,32010	1,05554
0,96	0,89912	2,28470	0,68438	1,37150	0,48472	1,14328	0,35156	1,06818	0,28779	1,04418
0,97	0,88735	2,16872	0,65499	1,32338	0,44760	1,11828	0,31368	1,05316	0,25074	1,03300

При всех значениях K $m_1=1$, $x_{\infty}=\infty$.

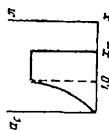
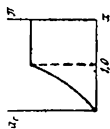
Таблица 10

Тип звена	I		II		III		IV		V	
	1А 1н	1В 1н	1В 1н	1В 1н	1А 1н	1В 1н	1В 1н	1В 1н	2А 1н	2В 1н
Тип звена										
Величина нормированных коэффициентов	$\alpha_1 = 1, 0$ $\beta_1 = 2, 0$		$\alpha_2 = 1, 0$ $\beta_2 = 2, 0$		$\alpha_3 = \frac{1 - m^2}{2m}$ $\beta_3 = 2m$		$\alpha_4 = m$ $\beta_4 = \frac{1 - m^2}{m}$ $\beta_5 = 2m$			
Частотная зависимость характеристического сопротивления			См. графу I		См. графу I		См. графу II			
	$Z_c = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$	$Z_c = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$							$Z_c = \frac{\sqrt{1 - x^2}}{1 - (1 - m^2) x^2}$	$Z_c = \frac{1 - (1 - m^2) x^2}{\sqrt{1 - x^2}}$

Частотные характеристики
затухания фильтра без
потерь



Частотные характеристики
фазового сдвига



Расчетные формулы для
определения затухания

Без учета
потерь

$$b_c = \ln \left| \frac{1+q}{1-q} \right|$$

$$q = \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}}$$

$$b_c = \ln \left| \frac{1+mq}{1-mq} \right|$$

$$q = \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}}$$

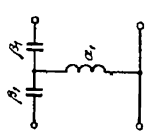
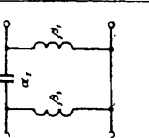
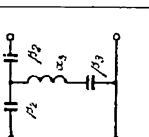
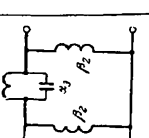
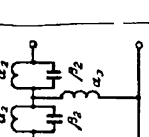
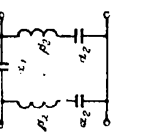
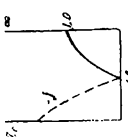
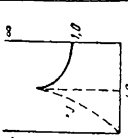
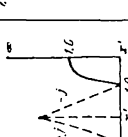
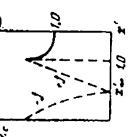
Полоса за-
держивания

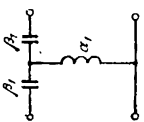
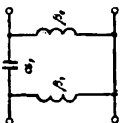
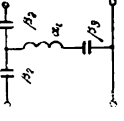
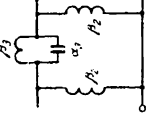
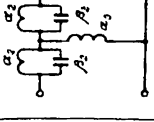
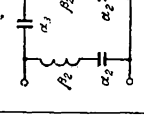
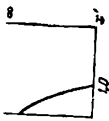
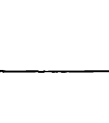




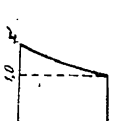


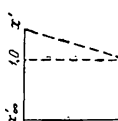


$$b_{\infty} = \ln \frac{4m^2}{(1 - m^2)^2} Q$$

При x_{∞}

Тип звена	I		II		III		IV		V		VI	
	1А In		1В In		1А In		1В In		2А In		2В In	
	Полоса пропускания		С учетом потерь		$b_{\pi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a}{2} \cdot \frac{x(1-x^2)}{2}}$ $\frac{a}{2} = \frac{x}{V1-x^2}$		$b_{\pi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a}{2} \cdot \frac{x(1-x^2)}{2}}$ $\frac{a}{2} = \frac{mx}{V1-x^2}$					
Значение елиничных индуктивностей и емкостей	$L = \frac{R_0}{2\pi f_1}; \quad C = \frac{1}{2\pi f_1 R_0}; \quad R_0 = \frac{R_1}{p_1}; \quad m = \frac{\sqrt{x_{\infty}^2 - 1}}{x_{co}}$											
Примечания					$x = \frac{f}{f_1}; \quad x_{\infty} = \frac{1}{V1-m^2}$							

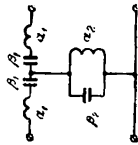
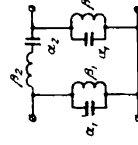
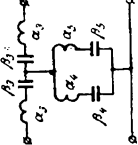
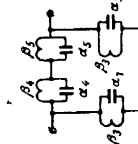
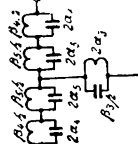
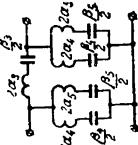
Таблица 11



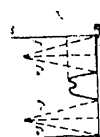
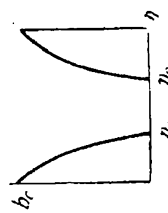
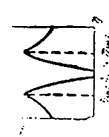
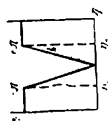
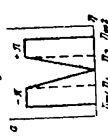
Тип звена	I	II	III	IV	V	VI
						
Величина нормированных коэффициентов	$\beta_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 0,5$	$\alpha_3 = \frac{1}{2m}$; $\beta_3 = \frac{1}{m}$	$\alpha_3 = \frac{1}{2m}$; $\beta_3 = \frac{1}{m}$	$\alpha_3 = \frac{1}{2m}$; $\beta_3 = \frac{1}{m}$	$\alpha_3 = \frac{m}{1-m^2}$; $\beta_3 = \frac{1}{1-m}$
Частотная зависимость характеристического сопротивления	 $Z_c = \frac{V \sqrt{x'^2 - 1}}{x'}$	 $Z_c = \frac{x'}{V \sqrt{x'^2 - 1}}$	См. графу I	См. графу II	 $Z_c = \frac{x' \sqrt{x'^2 - 1 + m^2}}{x' \sqrt{x'^2 - 1}}$	 $Z_c = \frac{x'^2 - 1 + m^2}{x' \sqrt{x'^2 - 1}}$

Тип звена	I		II		III		IV		V		VI	
	IA1B		IB1B		IA1B		IB1B		2A1B		2a1B	
												
Частотные характеристики затухания												
Частотные характеристики фазового сдвига												

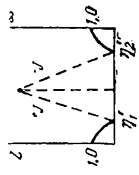
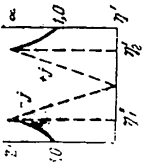
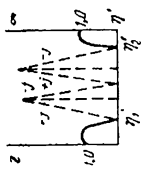
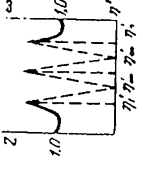
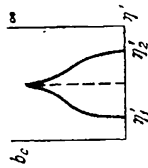
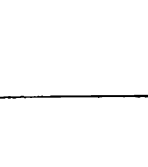
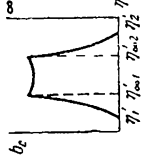

Полоса задерживания	Без учета потерь	$b_c = \ln \left \frac{1+q}{1-q} \right ;$ $q = \frac{1}{V 1-x'^2}$	$b_c = \ln \left \frac{1+mq}{1-mq} \right ;$ $q = \frac{1}{V 1-x'^2}$
	При x_∞		$b_c = \ln \frac{4m^2}{(1-m^2)^2} \frac{1}{Q}$
Полоса пропускания	С учетом потерь	$b_n = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{a}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \cdot \frac{x'}{x'^2 - 1};$ $\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{1}{V x'^2 - 1}$	$b_n = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{a}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \cdot \frac{x'}{x'^2 - 1};$ $\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{m}{V x'^2 - 1}$
Значения единичных индуктивностей	$L = \frac{R_0}{2\pi f_1}; C = \frac{1}{2\pi f_1 R_0}; R_0 = \frac{R_1}{\rho_1}$		
Примечания	$x' = \frac{f}{f_1}; x' \infty = V 1 - m^2$		

Таблица 12

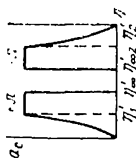
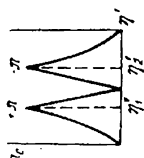
Тип звена	I		II		III		IV		V		VI	
	2A 2π		2B 2π		2A 2π		2B 2π		4A 2π		4B 2π	
Тип звена												
Величина нормированных коэффициентов	$\alpha_1 = n;$		$\alpha_2 = \frac{1}{2n};$		$\alpha_3 = mn;$		$\alpha_5 = \frac{1-m^2}{2m} n (1-\eta_{\infty 2}^2);$					
	$\beta_1 = \frac{1}{n};$		$\beta_2 = 2n$		$\beta_3 = \frac{1}{mn};$		$\beta_4 = \frac{2m}{1-m^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1+\eta_{\infty 1}^2};$					
							$\beta_5 = \frac{1-m^2}{2m} n (1+\eta_{\infty 1}^2);$				$\beta_6 = \frac{2m}{1-m^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1+\eta_{\infty 1}^2};$	

Частотная зависимость характеристического сопротивления	 $Z_c = \sqrt{1 - x^2}$  $Z_c = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$	См. графу I	См. графу II	 $Z_c = \frac{\sqrt{1 - x^2}}{1 - (1 - \eta^2) x^2}; \quad Z_c = \frac{1 - (1 - \eta^2) x^2}{\sqrt{1 - x^2}}$
Частотные характеристики затухания				
Частотные характеристики фазового сдвига				
Расчетные формулы для определения затухания	$b_c = \ln \left \frac{1 + q}{1 - q} \right ;$ $q = \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}}$			$b_c = \ln \left \frac{1 + mq}{1 - mq} \right ; \quad q = \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}};$ $b_\infty = \ln \frac{4m^2 Q}{(1 - m^2)^{3/2} n \left(1 + \frac{1}{\eta^2}\right)}$

Тип звена	I		II		III		IV		V		VI	
	2A 2π		2B 2π		2A 2π		2B 2π		4A 2π		4B 2π	
Расчет- ные фор- мулы для определе- ния зату- хания	$b_{11} = n \left(1 + \frac{1}{\eta^2} \right) Q \cdot \frac{\frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{a}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \cdot \frac{1}{a \cdot x(1-x^2)};$		$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$		$b_{11} = n \left(1 + \frac{1}{\eta^2} \right) Q \cdot \frac{\frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{a}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \cdot \frac{1}{a \cdot x(1-x^2)};$		$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{mx}{\sqrt{1-x^2}}; \quad b_0 = \frac{2nm}{Q}$					
Значение единич- ных индуктив- ностей и емкостей	$L = \frac{R_0}{2\pi f_0}; \quad C = \frac{1}{2\pi f_0 R_0}; \quad R_0 = \frac{R_1}{p_1}$											
Примечания	$\eta = \frac{f}{f_0}; \quad x = n \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right); \quad n = \frac{f_0}{f_2 - f_1}; \quad f_0 = \sqrt{f_1 f_2};$		$m = \frac{\sqrt{x_\infty^2 - 1}}{x_\infty}; \quad \eta_1 = \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2} - \frac{1}{2n}}; \quad \eta_2 = \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2} + \frac{1}{2n}}$									

Тип звена	I		II		III		IV	
	2A2з		2B2з		4A2з		4B2з	
Частотная зависимость характеристического сопротивления								
Частотные характери- стики затухания	$Z = \frac{\sqrt{x'^2 - 1}}{x'}$		$Z = \frac{x'}{\sqrt{x'^2 - 1}}$		$Z = \frac{x' \sqrt{x'^2 - 1}}{x'^2 - (1 - m^2)}$		$Z = \frac{x'^2 - (1 - m^2)}{x' \sqrt{x'^2 - 1}}$	
								

Частотные характеристики фазового сдвига



Полоса пропускания

$$b_c = \ln \left| \frac{1+q}{1-q} \right| ;$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{1-x'^2}}$$

$$b_c = \ln \left| \frac{1+mq}{1-mq} \right| ;$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{1-x'^2}}$$

Расчетные формулы для определения затухания

$$b_n = \frac{1}{Q} \left(1 + \frac{1}{\eta'^2} \right) \frac{\operatorname{tg} \frac{a}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \frac{x'}{x'^2 - 1} ;$$

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{m}{\sqrt{1-x'^2}}$$

$$b_n = \frac{1}{Q} n \left(1 + \frac{1}{\eta'^2} \right) \frac{\operatorname{tg} \frac{a}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \frac{x'}{x'^2 - 1} ;$$

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{m}{\sqrt{1-x'^2}}$$

Цена 21 коп.