РАСЧЕТ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы – получение законченных аналитических выражений для расчета коэффициента усиления, полосы пропускания и значений элементов корректирующих цепей наиболее известных и эффективных схемных решений построения усилительных каскадов на полевых транзисторах (ПТ). Основные результаты работы – вывод и представление в удобном для проектирования виде расчетных соотношений для усилительных каскадов с простой индуктивной и истоковой коррекциями, с четырехполюсными диссипативными межкаскадными корректирующими цепями второго и четвертого порядков, для входной и выходной корректирующих цепей. Для усилительного каскада с межкаскадной корректирующей цепью четвертого порядка приведена методика расчета, позволяющая реализовать заданный наклон его амплитудно-частотной характеристики с заданной точностью. Для всех схемных решений построения усилительных каскадов на ПТ приведены примеры расчета.

1 **ВВЕДЕНИЕ**

Расчет элементов высокочастотной коррекции является неотъемлемой частью процесса проектирования усилительных устройств. В известной литературе материал, посвященный этой проблеме, не всегда представлен в удобном для проектирования виде. В этой связи в статье собраны наиболее известные и эффективные схемные решения построения широкополосных усилительных устройств на ПТ, а соотношения для расчета коэффициента усиления, полосы пропускания и значений элементов корректирующих цепей даны без выводов. Ссылки на литературу позволяют найти, при необходимости, доказательства справедливости приведенных соотношений.

Особо следует отметить, что в справочной литературе по отечественным ПТ [1, 2] не приводятся значения элементов эквивалентной схемы замещения ПТ. Поэтому при расчетах следует пользоваться параметрами зарубежных аналогов [2, 3] либо осуществлять проектирование на зарубежной элементной базе [3].

2 **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ**

В соответствии с [4, 5, 6], предлагаемые ниже соотношения для расчета усилительных каскадов на ПТ основаны на использовании эквивалентной схемы замещения транзистора, приведенной на рисунке 2.1,а, и полученной на её основе однонаправленной модели, приведенной на рисунке 2.1,б.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 2.1

Здесь СЗИ – емкость затвор-исход, СЗС – емкость затвор-сток, ССИ – емкость сток-исток, RВЫХ – сопротивление сток-исток, S – крутизна ПТ, СВХ =.CЗИ +СЗС(1+SRЭ), RЭ=RВЫХRН/(RВЫХ+RН), RН – сопротивление нагрузки каскада на ПТ, CВЫХ=ССИ+СЗС.

**3 РАСЧЕТ НЕКОРРЕКТИРОВАННОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ИСТОКОМ**

3.1 **ОКОНЕЧНЫЙ КАСКАД**

Принципиальная схема некорректированного усилительного каскада приведена на рисунке 3.1,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 3.1,б.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 3.1

В соответствии с [6], коэффициент усиления каскада в области верхних частот можно описать выражением:

, (3.1)

где ; (3.2)

; (3.3)

; (3.4)

; (3.5)

; - текущая круговая частота.

При заданном уровне частотных искажений

(3.6)



верхняя частота fВ полосы пропускания каскада равна:

, (3.7)



где .



Входное сопротивление каскада на ПТ, без учета цепей смещения, определяется входной емкостью:

. (3.8)

**Пример 3.1.** Рассчитать fB, RC, CВХ каскада, приведенного на рисунке 3.1, при использовании транзистора КП907Б (СЗИ=20 пФ; СЗС=5 пФ; ССИ=12 пФ; RВЫХ=150 Ом; S=200 мА/В [7]) и условий: RН=50 Ом; YB=0,9; K0=4.

**Решение.** По известным K0 и S из (3.2) найдем: RЭ=20 Ом. Зная RВЫХ, RН и RЭ, из (3.3) определим: RС = 43 Ом. По (3.4) и (3.5) рассчитаем: С0=17 пФ; =. Подставляя известные и YВ в (3.7), получим: fB=227 МГц. По формуле (3.8) найдем: СВХ=45 пФ.



3.2 **ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КАСКАД**

Принципиальная схема каскада приведена на рисунке 3.2,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 3.2,б.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 3.2

Коэффициент усиления каскада в области верхних частот описывается выражением (3.1), в котором значения RЭ и С0 рассчитываются по формулам:

; (3.9)

, (3.10)

где СВХ – входная емкость нагружающего каскада.

Значения fB и СВХ каскада рассчитываются по соотношениям (3.7) и (3.8).

**Пример 3.2.** Рассчитать fB, RC, CВХ каскада, приведенного на рисунке 3.2, при использовании транзистора КП907Б (данные транзистора в примере 3.1) и условий: YB=0.9; K0=4; входная емкость нагружающего каскада - из примера 3.1.

**Решение.** По известным K0 и S из (3.2) найдем: RЭ=20 Ом. Зная RЭ и RВЫХ, из (3.9) определим: RC=23 Ом. По (3.10) и (3.4) рассчитаем С0=62 пФ; =. Подставляя известные и YB в (3.7), получим: fB=62 МГц. По формуле (3.8) найдем: СВХ=45 пФ.



3.3 **РАСЧЕТ ИСКАЖЕНИЙ, ВНОСИМЫХ ВХОДНОЙ ЦЕПЬЮ**

Принципиальная схема входной цепи каскада приведена на рисунке 3.3,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 3.3,б.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 3.3

Коэффициент передачи входной цепи в области верхних частот описывается выражением [6]:

,

где ; (3.11)

; (3.12)

;

СВХ – входная емкость каскада на ПТ.

Значение fB входной цепи рассчитывается по формуле (3.7).

**Пример 3.3.** Рассчитать K0 и fB входной цепи, приведенной на рисунке 3.3, при условиях : RГ=50 Ом; RЗ=1 МОм; YB=0,9; CВХ – из примера 3.1.

**Решение.** По (3.11) найдем: K0=1, по (3.12) определим: =. Подставляя и YB в (3.7), получим: fB=34,3 МГц.



**4 РАСЧЕТ КАСКАДА С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИНДУКТИВНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ**

Принципиальная схема каскада с высокочастотной индуктивной коррекцией приведена на рисунке 4.1,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 4.1,б.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 4.1

Коэффициент усиления каскада в области верхних частот можно описать выражением [6]:

,

где K0=SRЭ; (4.1)

;

;

;

;

;

.

Значение , соответствующее оптимальной по Брауде амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) [6], рассчитывается по формуле:

. (4.2)

При заданном значении YB верхняя частота полосы пропускания каскада равна:

. (4.3)

Входная емкость каскада определяется соотношением (3.8).

При работе каскада в качестве предоконечного все перечисленные выше соотношения справедливы. Однако RЭ, R0 и С0 принимаются равными:

, (4.4)

где СВХ – входная емкость оконечного каскада.

**Пример 4.1.** Рассчитать fB, LC, RC, CВХ каскада, приведенного на рисунке 4.1, при использовании транзистора КП907Б (данные транзистора - в примере 3.1) и условий: YB=0,9; K0=4; каскад работает в качестве предоконечного; входная емкость нагружающего каскада - из примера 3.1.

**Решение.** По известным K0 и S из (4.1) найдем: RЭ=20 Ом. Далее по (4.4) получим: RC=23 Ом; R0= 150 Ом; C0=62 пФ; =. Подставляя C0, RC, R0 в (4.2), определим: LCопт=16,3 нГн. Теперь по формуле (4.3) рассчитаем: fB=126 МГц. Из (3.8) найдем: CВХ=45 пФ.



# 5 **РАСЧЕТ КАСКАДА С ИСТОКОВОЙ КОРРЕКЦИЕЙ**

Принципиальная схема каскада с истоковой коррекцией приведена на рисунке 5.1,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 5.1,б.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 5.1

Коэффициент усиления каскада в области верхних частот можно описать выражением [6]:

,

где K0=SRЭ/F; (5.1)

; (5.2)

;

;

;

.

Значение С1опт, соответствующее оптимальной по Брауде АЧХ, рассчитывается по формуле:

. (5.3)

При заданном значении YB верхняя частота полосы пропускания каскада равна:

. (5.4)

Входная емкость каскада определяется соотношением:

. (5.5)

При работе каскада в качестве предоконечного все перечисленные выше соотношения справедливы. Однако RЭ и С0 принимаются равными:

, (5.6)

где СВХ – входная емкость оконечного каскада.

**Пример 5.1.** Рассчитать fB, R1, С1, СВХ каскада, приведенного на рисунке 5.1, при использовании транзистора КП907Б (данные транзистора - в примере 3.1) и условий: YB=0,9; K0=4; каскад работает в качестве предоконечного; входная емкость нагрузочного каскада - из примера 3.1.

**Решение**. По известным K0, S, RЭ из (5.1), (5.2) найдем: F=7,5 ; R1=32,5 Ом. Далее получим: С0=62 пФ; =. Из (5.3) определим С1опт=288 пФ. Теперь по формуле (5.4) рассчитаем: fB=64,3 МГц. Из (5.5) найдем: СВХ=23,3 пФ.



# 6 **РАСЧЕТ ВХОДНОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ**

Из приведенных выше примеров расчета видно, что наибольшие искажения АЧХ обусловлены входной цепью. Для расширения полосы пропускания входных цепей усилителей на ПТ в [8] предложено использовать схему, приведенную на рисунке 6.1.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 6.1

Коэффициент передачи входной цепи в области верхних частот можно описать выражением:

,

где ; (6.1)

;

;

;

;

СВХ – входная емкость каскада на ПТ.

Значение L3опт, соответствующее оптимальной по Брауде АЧХ, рассчитывается по формуле:

. (6.2)

При заданном значении YB и расчете LЗопт по (6.2) верхняя частота полосы пропускания входной цепи равна:

. (6.3)



**Пример 6.1.** Рассчитать fB, RЗ, LЗ входной цепи, приведенной на рисунке 6.1, при условиях: YB=0,9; RГ=50 Ом; СВХ – из примера 3.1; допустимое уменьшение К0 за счет введения корректирующей цепи – 2 раза.

**Решение**. Из условия допустимого уменьшения К0 и соотношения (6.1) найдем: RЗ=50 Ом. Подставляя известные СВХ, RГ и RЗ в (6.2), получим: LЗопт=37,5 нГн. Далее определим: =; =. Подставляя найденные величины в (6.3), рассчитаем: fB=130 МГц.



7 **РАСЧЕТ ВЫХОДНОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ**

В рассматриваемых выше усилительных каскадах расширение полосы пропускания связано с потерей части выходной мощности в резисторах корректирующих цепей (КЦ) либо цепей обратной связи. От выходных каскадов усилителей требуется, как правило, получение максимально возможной выходной мощности в заданной полосе частот. Из теории усилителей известно [9], что для выполнения указанного требования необходимо реализовать ощущаемое сопротивление нагрузки для внутреннего генератора транзистора равным постоянной величине во всем рабочем диапазоне частот. Этого можно достигнуть, включив выходную емкость транзистора в фильтр нижних частот, используемый в качестве выходной КЦ. Схема включения выходной КЦ приведена на рисунке 7.1.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |

Рисунок 7.1

При работе выходного каскада без выходной КЦ модуль коэффициента отражения ощущаемого сопротивления нагрузки внутреннего генератора транзистора равен [9]:

. (7.1)

Уменьшение выходной мощности относительно максимального значения, обусловленное наличием CВЫХ, составляет величину:

, (7.2)

где – максимальное значение выходной мощности на частоте при условии равенства нулю СВЫХ; – максимальное значение выходной мощности на частоте при наличии СВЫХ.

Использование фильтра нижних частот в качестве выходной КЦ при одновременном расчете элементов L1, C1 по методике Фано [9] позволяет обеспечить минимально возможное, соответствующее заданным CВЫХ и fB, значение максимальной величины модуля коэффициента отражения в полосе частот от нуля до fB.

В таблице 7.1 приведены нормированные значения элементов L1, C1, CВЫХ, рассчитанные по методике Фано, а также коэффициент , определяющий величину ощущаемого сопротивления нагрузки RОЩ, относительно которого вычисляется [9].

## Таблица 7.1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 0,1 | 0,18 | 0,099 | 0,000 | 1,000 |
| 0,2 | 0,382 | 0,195 | 0,002 | 1,001 |
| 0,3 | 0,547 | 0,285 | 0,006 | 1,002 |
| 0,4 | 0,682 | 0,367 | 0,013 | 1,010 |
| 0,5 | 0,788 | 0,443 | 0,024 | 1,020 |
| 0,6 | 0,865 | 0,513 | 0,037 | 1,036 |
| 0,7 | 0,917 | 0,579 | 0,053 | 1,059 |
| 0,8 | 0,949 | 0,642 | 0,071 | 1,086 |
| 0,9 | 0,963 | 0,704 | 0,091 | 1,117 |
| 1,0 | 0,966 | 0,753 | 0,111 | 1,153 |
| 1,1 | 0,958 | 0,823 | 0,131 | 1,193 |
| 1,2 | 0,944 | 0,881 | 0,153 | 1,238 |
| 1,3 | 0,927 | 0,940 | 0,174 | 1,284 |
| 1,4 | 0,904 | 0,998 | 0,195 | 1,332 |
| 1,5 | 0,882 | 1,056 | 0,215 | 1,383 |
| 1,6 | 0,858 | 1,115 | 0,235 | 1,437 |
| 1,7 | 0,833 | 1,173 | 0,255 | 1,490 |
| 1,8 | 0,808 | 1,233 | 0,273 | 1,548 |
| 1,9 | 0,783 | 1,292 | 0,292 | 1,605 |
| 2,0 | 0,760 | 1,352 | 0,309 | 1,664 |

Истинные значения элементов рассчитываются по формулам:

(7.3)



Расчет частотных искажений, вносимых выходной цепью оконечного каскада, приведен в разделе 3.1. При использовании выходной КЦ частотные искажения, вносимые выходной цепью, определяются соотношением:

. (7.4)

Коэффициент усиления каскада с выходной КЦ определяется выражением (3.2).

**Пример 7.1.** Рассчитать выходную КЦ для усилительного каскада на транзисторе КП907Б (данные транзистора - в примере 3.1) при RН=50 Ом, fB=200 МГц. Определить RОЩ, уменьшение выходной мощности на частоте fB и уровень частотных искажений, вносимых выходной цепью при использовании КЦ и без нее.

**Решение.** Найдем нормированное значение СВЫХ: = == 1,07. Ближайшее значение коэффициента в таблице 7.1 равно 1,056. Этому значению соответствуют: =1,5; =0,882; =0,215; =1,382. После денормирования по формулам (7.3) имеем: =35,1 нГн; =24 пФ; RОЩ=36,2 Ом. Используя соотношения (7.1), (7.2), найдем, что при отсутствии выходной КЦ уменьшение выходной мощности на частоте fB, обусловленное наличием СВЫХ, составляет 2,14 раза, а при ее использовании - 1,097 раза. При отсутствии выходной КЦ уровень частотных искажений, вносимых выходной цепью, определяется соотношением (3.7). Для условий примера 7.1 =. Подставляя в (3.7) известные и fB, получим: YB==0,795. При наличии выходной КЦ из (7.4) найдем: YB = 0,977.



8 **РАСЧЕТ ДИССИПАТИВНОЙ МЕЖКАСКАДНОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА**

Принципиальная схема усилителя с межкаскадной КЦ второго порядка приведена на рисунке 8.1,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 8.1,б. [10].

|  |
| --- |
|  |
| а) |
|  |
| б) |

Рисунок 8.1

Коэффициент усиления каскада на транзисторе T1 в области верхних частот можно описать выражением [11, 12]:

, (8.1)

где K0=SRЭ; (8.2)

;

;

;

;

– сопротивление сток-исток транзистора T1; ; ; ; ; – нормированные относительно и значения элементов , , , , ; =; ; – нормированная частота; – текущая круговая частота; – высшая круговая частота полосы пропускания разрабатываемого усилителя; – входная емкость транзистора Т2; – выходная емкость транзистора T1.



В таблице 8.1 приведены нормированные значения элементов , , , вычисленные для ряда нормированных значений , при двух значениях допустимой неравномерности АЧХ .



Таблица 8.1 получена с помощью методики проектирования согласующе-выравнивающих цепей транзисторных усилителей, предполагающей составление и решение системы компонентных уравнений [13], и методики синтеза прототипа передаточной характеристики, обеспечивающего максимальный коэффициент усиления каскада при заданной допустимой неравномерности АЧХ в заданной полосе частот [14].

## Таблица 8.1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | дБ | | | дБ | | |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 0,01 | 1,597 | 88,206 | 160,3 | 2,02 | 101 | 202,3 |
| 0,05 | 1,597 | 18,08 | 32,061 | 2,02 | 20,64 | 40,47 |
| 0,1 | 1,597 | 9,315 | 16,03 | 2,02 | 10,57 | 20,23 |
| 0,15 | 1,597 | 6,393 | 10,69 | 2,02 | 7,21 | 13,5 |
| 0,2 | 1,596 | 4,932 | 8,019 | 2,02 | 5,5 | 10,1 |
| 0,3 | 1,596 | 3,471 | 5,347 | 2,02 | 3,856 | 6,746 |
| 0,4 | 1,595 | 2,741 | 4,012 | 2,02 | 3,017 | 5,06 |
| 0,6 | 1,594 | 2,011 | 2,677 | 2,02 | 2,177 | 3,373 |
| 0,8 | 1,521 | 1,647 | 2,011 | 2,02 | 1,758 | 2,53 |
| 1 | 1,588 | 1,429 | 1,613 | 2,02 | 1,506 | 2,025 |
| 1,2 | 1,58 | 1,285 | 1,351 | 2,02 | 1,338 | 1,688 |
| 1,5 | 1,467 | 1,178 | 1,173 | 2,02 | 1,17 | 1,352 |
| 1,7 | 1,738 | 1,017 | 0,871 | 2,015 | 1,092 | 1,194 |
| 2 | 1,627 | 0,977 | 0,787 | 2,00 | 1,007 | 1,023 |
| 2,5 | 1,613 | 0,894 | 0,635 | 2,03 | 0,899 | 0,807 |
| 3 | 1,61 | 0,837 | 0,53 | 2,026 | 0,833 | 0,673 |
| 3,5 | 1,608 | 0,796 | 0,455 | 2,025 | 0,785 | 0,577 |
| 4,5 | 1,606 | 0,741 | 0,354 | 2,025 | 0,721 | 0,449 |
| 6 | 1,605 | 0,692 | 0,266 | 2,024 | 0,666 | 0,337 |
| 8 | 1,604 | 0,656 | 0,199 | 2,024 | 0,624 | 0,253 |
| 10 | 1,604 | 0,634 | 0,160 | 2,024 | 0,598 | 0,202 |

При известных значениях , , , , расчет межкаскадной КЦ состоит из следующих этапов. Вычисление . Нормирование значения по формуле: . Нахождение по таблице 8.1 ближайшего к вычисленному табличного значения . Определение по таблице 8.1 соответствующих значений , , и их денормирование по формулам: ; ; . Вычисление значения : .



При использовании рассматриваемой КЦ в качестве входной принимается равной нулю, принимается равным , а коэффициент передачи входной цепи на средних частотах рассчитывается по формуле (3.11).

В случае необходимости построения нормированной частотной характеристики проектируемого усилительного каскада значения , , , следует подставить в (8.1) и найти модуль . Реальная частотная характеристика может быть найдена после денормирования коэффициентов , , по формулам: ; ; .



**Пример 8.1.** Рассчитать межкаскадную КЦ усилительного каскада, приведенного на рисунке 8.1, его и при использовании транзисторов КП907Б (данные транзистора - в примере 3.1) и условий: fB=100 МГц; входная емкость нагружающего каскада - из примера 3.1; допустимая неравномерность АЧХ - дБ, =1 кОм.



**Решение.** По известным , и найдем: = ==3,67. Из таблицы 8.1 для неравномерности АЧХ дБ и для ближайшего табличного значения нормированной величины , равного 3,5, имеем: =2,025, =0,785, =0,577. Денормируя , и , получим: =24,8 пФ; L2=162 нГн; R3=75 Ом. Теперь по (8.2) рассчитаем: K0=9,5. Вычитая из величину , определим: С1= =7,8 пФ. Из (3.8) найдем: СВХ=72,5 пФ.



10 **РАСЧЕТ ДИССИПАТИВНОЙ МЕЖКАСКАДНОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА**

Принципиальная схема усилителя с межкаскадной корректирующей цепью четвертого порядка [15] приведена на рисунке 9.1,а, эквивалентная схема по переменному току - на рисунке 9.1,б.

|  |
| --- |
|  |
| а) |
|  |
| б) |

Рисунок 9.1

Несмотря на то, что КЦ содержит пять корректирующих элементов, конструктивно ее выполнение может оказаться проще выполнения КЦ второго порядка.

Коэффициент усиления каскада на транзисторе T1 в области верхних частот можно описать выражением [14]:

, (9.1)

где ; (9.2)

;

;

;

;

;



;

RВЫХ1 – сопротивление сток-исток транзистора T1; СВХ2 – входная емкость транзистора T2; , , , , – нормированные относительно и значения элементов L1, R2, C3, C4, L5, соответствующие преобразованной схеме КЦ, в которой значение CВЫХ1 равно нулю, а значение СВХ2 равно бесконечности; СВЫХ1 – выходная емкость транзистора T1; ; – нормированная частота; – текущая круговая частота; – высшая круговая частота полосы пропускания разрабатываемого усилителя.

В таблице 9.1 приведены нормированные значения элементов L1, R2, C3, C4, L5, вычисленные для случая реализации усилительного каскада с различным наклоном АЧХ, лежащим в пределах дБ, при допустимом значении равном дБ и дБ, и при условии равенства нулю значения СВЫХ1 и бесконечности - значения СВХ2.



Таблица 9.1 получена с помощью методики проектирования согласующе-выравнивающих цепей транзисторных усилителей, предполагающей составление и решение систем компонентных уравнений [13], и методики синтеза прототипа передаточной характеристики, обеспечивающего максимальный коэффициент усиления каскада при заданной допустимой неравномерности АЧХ в заданной полосе частот [14].

# Таблица 9.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наклон АЧХ, дБ | = дБ | | | | | = дБ | | | | |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| -6 | 2,40 | 1,58 | 5,85 | 2,34 | 0,451 | 2,43 | 1,21 | 6,75 | 2,81 | 0,427 |
| -5 | 2,47 | 1,63 | 5,53 | 2,39 | 0,426 | 2,43 | 1,22 | 6,49 | 2,90 | 0,401 |
| -4 | 2,49 | 1,65 | 5,23 | 2,48 | 0,399 | 2,41 | 1,20 | 6,24 | 3,03 | 0,374 |
| -3 | 2,48 | 1,64 | 4,97 | 2,60 | 0,374 | 2,36 | 1,18 | 6,02 | 3,20 | 0,348 |
| -2 | 2,42 | 1,59 | 4,75 | 2,74 | 0,351 | 2,32 | 1,16 | 5,77 | 3,36 | 0,327 |
| -1 | 2,29 | 1,51 | 4,59 | 2,93 | 0,327 | 2,30 | 1,15 | 5,47 | 3,50 | 0,309 |
| 0 | 2,09 | 1,38 | 4,49 | 3,18 | 0,303 | 2,22 | 1,11 | 5,23 | 3,69 | 0,291 |
| +1 | 1,84 | 1,21 | 4,49 | 3,52 | 0,277 | 2,08 | 1,04 | 5,08 | 3,93 | 0,273 |
| +2 | 1,60 | 1,05 | 4,52 | 3,91 | 0,252 | 1,88 | 0,94 | 5,02 | 4,26 | 0,253 |
| +3 | 1,33 | 0,876 | 4,69 | 4,47 | 0,225 | 1,68 | 0,842 | 4,99 | 4,62 | 0,234 |
| +4 | 2,69 | 1,35 | 3,34 | 3,29 | 0,281 | 1,51 | 0,757 | 4,97 | 5,02 | 0,217 |
| +5 | 2,23 | 1,11 | 3,43 | 3,67 | 0,257 | 1,32 | 0,662 | 5,05 | 5,54 | 0,198 |
| +6 | 1,76 | 0,879 | 3,65 | 4,27 | 0,228 | 1,10 | 0,552 | 5,29 | 6,31 | 0,176 |

Для расчета нормированных значений элементов L1, R2, C3, C4, L5, обеспечивающих заданную форму АЧХ с учетом реальных нормированных значений СВЫХ1 и СВХ2, следует воспользоваться формулами пересчета [14]:

(9.3)



где СВЫХ1Н, СВХ2Н – нормированные относительно RВЫХ1 и значния СВЫХ1 и СВХ2.



При известных значениях , RВЫХ1, СВЫХ1, СВХ2, расчет межкаскадной КЦ состоит из следующих этапов. Вычисление нормированных значений СВЫХ1 и СВХ2 по формуле: СН=. Определение табличных значений элементов , , , , по заданному наклону и требуемой неравномерности АЧХ. Расчет L1, R2, C3, C4, L5 по формулам пересчета (9.3) и их денормирование.



При использовании рассматриваемой КЦ в качестве входной СВЫХ1 принимается равной нулю, RВЫХ1 принимается равным RГ, а коэффициент передачи входной цепи на средних частотах рассчитывается по формуле:

. (9.4)

В случае необходимости построения нормированной частотной характеристики проектируемого усилительного каскада значения , , , , следует подставить в (9.1) и найти модуль KU. Реальная частотная характеристика может быть рассчитана после денормирования коэффициентов , , , , по формулам: ; ; ; ; .



**Пример 9.1.** Рассчитать межкаскадную КЦ усилителя, приведенного на рисунке 9.1, его K0 и СВХ при использовании транзистора КП907Б (данные транзистора - в примере 3.1) и условий: fB=100 МГц; входная емкость нагружающего каскада - из примера 3.1; допустимая неравномерность АЧХ - дБ; наклон АЧХ - 0 дБ.



**Решение**. Из таблицы 9.1 для неравномерности АЧХ + 0,5 дБ и наклона АЧХ, равного 0 дБ, имеем: =2,22; =1,11; =5,23; =3,69; =0,291. Нормированные значения СВЫХ1 и СВХ2 равны: СВЫХ1Н= ==1,6; СВХ2Н==4,24. Подставляя найденные величины в (9.3), получим: L1H=2,22; R2Н=1,11; С3Н=14,6; С4Н=0,587; L5Н=0,786. Денормируя полученные значения, определим: L1==530 нГн; R2==167 Ом; С3==154 пФ; С4=6,2 пФ; L5=187 нГн. Теперь по (9.2) рассчитаем: K0=11,86. Из (3.8) найдем: СВХ=84,3 пФ.



ЛИТЕРАТУРА

1. Перельман Б.Л. Новые транзисторы: Справочник. – М.: Солон, 1996.
2. Петухов В.М. Полевые и высокочастотные биполярные транзисторы средней и большой мощности и их зарубежные аналоги: Справочник. – М.: КУБК-а, 1997.
3. Полевые транзисторы: Справочник. – Faber. STM. Publications, 1997.
4. Шварц Н.З. Усилители СВЧ на полевых транзисторах. – М.: Радио и связь, 1987.
5. Никифоров В.В., Кулиш Т.Т., Шевнин И.В. К проектированию широкополосных усилителей мощности КВ- УКВ- диапазона на мощных МДП-транзисторах // В сб.: Полупроводниковые приборы в технике связи / Под ред. И.Ф. Николаевского. – М.: Радио и связь. -1993.- Вып. 23.
6. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Связь, 1977.
7. Никифоров В.В., Максимчук А.А. Определение элементов эквивалентной схемы мощных МДП-транзисторов // В сб.: Полупроводниковая электроника в технике связи / Под ред. И.Ф. Николаевского. – М.: Радио и связь.- 1985.- Вып. 25.
8. Никифоров В.В., Терентьев С.Ю. Синтез цепей коррекции широкополосных усилителей мощности с применением методов нелинейного программирования // В сб.: Полупроводниковая электроника в технике связи / Под ред. И.Ф. Николаевского. – М.: Радио и связь. - 1986. - Вып. 26.
9. Широкополосные радиопередающие устройства / Алексеев О.В., Головков А.А., Полевой В.В., Соловьев А.А. / Под ред. О.В. Алексеева. – М.: Связь, 1978.
10. Титов А.А., Ильюшенко В.Н., Авдоченко Б.И., Обихвостов В.Д. Широкополосный усилитель мощности для работы на несогласованную нагрузку // ПТЭ. - 1996. - №2. - С.68-69.
11. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. – М.: Сов. радио, 1980.
12. Бабак Л.И., Дьячко А.Н., Дергунов С.А. Расчет цепей коррекции мощных сверхширокополосных транзисторных СВЧ-усилителей // Полупроводниковая электроника в технике связи /Под ред. И.Ф. Николаевского. – М.: Радио и связь. - 1988. - Вып. 27.
13. Бабак Л.И., Шевцов А.Н., Юсупов Р.Р. Пакет программ автоматизированного расчета транзисторных широкополосных и импульсных УВЧ- и СВЧ-усилителей // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. - 1993. - №3. - С.60-63.
14. Титов А.А. Расчет диссипативной межкаскадной корректирующей цепи широкополосного усилителя мощности // Радиотехника. - 1989. - №2. - С.88-90.
15. Жаворонков В.И., Изгагин Л.Н., Шварц Н.З. Транзисторный усилитель СВЧ с полосой пропускания МГц // Приборы и техника эксперимента. – 1972. - №3. - С.134-135.