

621.382.3

38762

T-23

РАДИОКОМПОНЕНТЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ®

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРОВАН-
НЫМ ЗАТВОРОМ ТИПА ТН-12М

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
НОВОСИБИРСКОЕ ОБЛАСТНОЕ ОБЩЕСТВО "ЗНАНИЕ"

Заочный семинар

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АКТИВНЫХ РАДИО-
КОМПОНЕНТОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Л е к ц и я I 5

И.И.Антонов, А.Н.Киреев, В.И.Першин
Полевой транзистор с изолированным
затвором типа ТН-12М

Ответственный редактор А.А. В А Л Ь К О В

Издательство "НАУКА" • Сибирское отделение
Новосибирск - 1970

38762

Описываются конструкция и принцип действия полевого транзистора с изолированным затвором.

Приводятся основные электрические параметры МДП-триода типа ТН-12М (в том числе высокочастотные свойства и перекрестная модуляция).

Рассматривается ряд схем с обсуждением результатов исследований МДП-триода ТН-12М: УКВ-блок, ПТК, УПЧ и другие каскады. Показано, что предельная частота усиления транзистора ТН-12М ≈ 550 МГц.

Новый класс полупроводниковых приборов - полевые транзисторы - содержит два основных типа: транзисторы с управлением через р-п переход и с изолированным затвором (МДП-транзисторы).

МДП-транзисторы отличаются практически самым высоким входным сопротивлением (10^{14} – 10^{15} ом и более) среди всех активных компонентов [1]. Кроме того, наличие малых межэлектродных емкостей и высокой крутизны позволяет реализовать высокочастотность этих приборов до нескольких сотен мегагерц, обеспечивая при этом высокий коэффициент усиления мощности и низкий коэффициент шума.

Наиболее перспективными областями применения МДП-транзисторов могут быть высокочастотные узлы радиоприемных устройств различного целевого назначения, электрометрические и ключевые схемы. Главными преимуществами этих схем являются соответственно низкий уровень перекрестной модуляции, малый ток затвора и высокое быстродействие.

Обширной областью применения МДП-транзисторов будут интегральные схемы [2].

Несмотря на существующую тенденцию построения аппаратуры на интегральных схемах, МДП-транзистор благодаря особым качествам может найти значительное применение и как дискретный элемент в ряде схем, обеспечивая бесспорные преимущества перед другими активными компонентами и тем самым способствуя дальнейшему прогрессу радиоаппаратуры.

МДП-транзистор - прибор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник.

* Лекция не заменяет ЧТУ.

Промышленностью выпускаются МДП-транзисторы с проводимостью каналов р- и n-типа. Приборы с n-каналом при той же геометрии имеют более высокую крутизну и высокочастотность.

В данном выпуске содержатся сведения о параметрах и схемах применения кремниевого МДП-триода с n-каналом типа ТН-12М. По устойчивости к перекрестной модуляции эти полевые транзисторы значительно превосходят (более чем на порядок) биполярные транзисторы, а также большинство приемно-усилительных ламп.

По шумам в УКВ диапазоне ТН-12М находится на уровне лучших маломощных приемно-усилительных ламп, по усилению несколько уступают лампам и биполярным транзисторам.

Основные преимущества полевых МДП-транзисторов перед другими активными элементами:

- исключительно высокое входное сопротивление для постоянного тока и хорошая изоляция между входом и выходом;
- большое усиление по току и мощности;
- отсутствие остаточного напряжения в цепи канала;
- квадратичность характеристики (обеспечивает низкий уровень перекрестной модуляции);
- работоспособность в условиях сверхнизких температур (при этом ряд параметров улучшается);
- слабая зависимость входных и выходных емкостей от питающих напряжений;
- возможность использования полевого транзистора в качестве резистора, регулируемого управляющим напряжением;
- экономичность (потребление мощности от источников питания) на уровне биполярных транзисторов;
- хорошая высокочастотность;
- низкий уровень шума на высоких частотах.

Полевой МДП-транзистор является активным элементом, который управляет напряжением и обеспечивает очень высокое усиление мощности; в ряде случаев он может полностью заменить (по ха-

рактеристикам) электровакуумную лампу. По форме электрические характеристики транзистора напоминают характеристики радиолампы (пентода).

Основные области применения МДП-триодов:

- блоки высокой частоты до 250-300 МГц (выключательно (УВЧ и преобразователи);

- электрометрические усилители;
- ключевые схемы.

Полевые транзисторы ТН-12М могут также найти эффективное применение в следующих электрических схемах [3]:

- усилители постоянного тока к стрелочным и самопишущим приборам (нановольметры, микроамперметры, особо высокоомные милливольтметры, вольтметры, мегаомметры и т.д.);
- усилители постоянного тока с высокоомным входом к устройствам электродвигателя;
- реле времени;
- усилители системы автоматической регулировки усиления радиоприемных устройств;
- аттенуаторы, управляемые напряжением;
- RC - генераторы синусоидальных колебаний;
- генераторы пилообразных напряжений;
- усилители низкой частоты, работающие от высокоомных датчиков;
- активные избирательные фильтры;
- стабилизированные источники питания;
- нуль-органы цифровых вольтметров;
- огибающие модуляторы;
- синхронные детекторы;
- источник повторитель с особо высокоомным входом;
- устройства для запоминания напряжения (аналоговая память);
- расширители импульсов;
- схема возведения в квадрат;

- задающие кварцевые генераторы и гетеродины;
- видеоконные видеосушители с высоким входным сопротивлением.

Условные обозначения

В выпуске приняты следующие обозначения электрических параметров и других физических величин:

- S - крутизна характеристики;
- R_i - внутреннее сопротивление;
- I_0 - ток стока;
- I_B - ток затвора;
- R_a - сопротивление затвора;
- U_{oi} - напряжение на стоке относительно истока;
- U_{oi} - напряжение на затворе относительно истока;
- U_0 - пороговое напряжение (напряжение отсечки);
- U_n - напряжение помехи;
- E_c - напряжение источника питания в цепи стока;
- E_z - напряжение источника питания в цепи затвора;
- P_c - мощность, рассеиваемая на стоке;
- C_{zi} - емкость цепи затвор-исток;
- C_{zo} - емкость цепи затвор-сток;
- C_{si} - емкость цепи сток-исток;
- C_n - емкость нейтрализации;
- C_{II} - входная емкость при замкнутом выходе ($C_{II} = C_{zi} + C_{zo}$);
- C_{22} - выходная емкость при замкнутом входе ($C_{22} = C_{si} + C_{zo}$);
- C_{12} - емкость обратной связи (проходная емкость);
- σ_{11} - входная активная проводимость при короткозамкнутом выходе;
- σ_{22} - выходная активная проводимость при короткозамкнутом входе;
- σ_{12} - активная проводимость обратной передачи;
- σ_1 - внутренняя проводимость;

- I/σ_{11} - входное сопротивление;
- Z - полное сопротивление;
- $1/\sigma_{22}$ - выходное сопротивление;
- K_p - коэффициент усиления по мощности;
- K_u - коэффициент усиления по напряжению;
- K_n - коэффициент шума;
- R_{oe} - эквивалентное сопротивление контура;
- R_a - сопротивление источника сигнала (антенны);
- R - активное сопротивление нагрузки;
- ω - круговая частота;
- f - циклическая частота;
- f_0 - средняя частота настройки;
- Δf - полоса пропускания на уровне 0,7;
- $f_{пред.ус.}$ - предельная частота усиления, при которой $K_p = 1$;
- $K.c.v.$ - коэффициент стоячей волны;
- $U_{шх}$ - напряжение шумов, приведенное ко входу;
- $U_{упр.}$ - управляющее напряжение;
- t_{oc} - температура.

КОНСТРУКЦИЯ, ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Устройство полевого транзистора типа TH-12M

Устройство транзистора показано на рис. 1*. Методом диффузии в теле кристалла размером 0.25 мм^2 создаются два p-n - переходы - исток и сток, на которые наносятся алюминиевые контакты. Область между истоком и стоком покрыта тонким двухслойным диэлектриком ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$), на котором находится алюминиевый контакт-затвор.

Кристалл напаяется на ножку корпуса типа TO-18 посред-ством золотой прокладки. Алюминиевые контакты кристалла соединяются золотыми проволочками с выводами ножки.

Выводы ножки, кроме одного, изолированы от корпуса. Колпачок корпуса приваривается к донышку по всему периметру, обеспечивая герметизацию объема, в котором находится кристалл.

На рис. 2 приводятся габариты и цоколевка прибора, на рис. 3 - схема полевого МДП-триода, для сравнения показаны вакуумный триод и биполярный транзистор.

В связи с тем, что диэлектрический слой SiO_2 , покрывающий площадь кристалла (в том числе и область под затвором), обладает положительным зарядом, на поверхности кремниевой подложки образуется инверсионный n-слой, который при подаче на сток положительного напряжения замыкает n-область истока и стока каналом с n-проводимостью.

При подаче на затвор положительного напряжения происходит дальнейшее обогащение канала n-носителями из материала подложки, что приводит к увеличению тока стока; при отрицательном напряжении на затворе происходит обеднение n-канала, а затем и его запираение (напряжение отсечки U_0), что обуславливает уменьшение, а затем и прекращение движения тока от истока к стоку. Таким образом, при постоянном напряжении на стоке путем изменения напряжения затвора возможна модуляция тока стока. При постоянном напряжении на затворе повышение напряжения на стоке увеличивает ток стока, который вызывает увеличение омического падения напряжения вдоль канала. Полярность этого падения напряжения такова, что оно стремится противодействовать полю, создаваемому затвором.

Когда падение напряжения достигает такой величины, что инверсия в данном (и более близком к стоку) месте канала уже не возникает, канал переходит в состояние перекрытия. При дальнейшем увеличении напряжения стока сопротивление перекрытой части канала растет пропорционально напряжению стока, что приводит, как говорят, к насыщению характеристикам тока стока (пологая часть характеристики); слишком большое увеличение напряжения на стоке может вызвать распространение обедненной области от стока на всю длину канала до истока, что приведет к возникновению неуправляемого тока.

* Иллюстрации см. в конце раздела.

Статистические характеристики

На рис. 4 показано семейство стоковых характеристик (зависимости тока стока в функции напряжения на стоке при $U_{зи} = \text{const}$); как видно, оно подобно семейству анодных характеристик вакуумной лампы - пентода. Участок левее перегиба принято называть триодным, участок правее - пентодным, особенностью которого является насыщение тока стока при некотором стоковом напряжении (2-4 в).

Режим насыщения тока является предпочтительным в усилительных схемах, поскольку при этом обеспечивается максимальное внутреннее сопротивление (R_i).

Семейство переходных характеристик (зависимости тока стока в функции напряжения на затворе при $U_{си} = \text{const}$) показано на рис. 5-6. Особенность этих характеристик состоит в том, что начало всех кривых соответствует напряжению отсечки (U_0). Важным следует считать то, что переходная характеристика аппроксимируется функцией, близкой к квадратичной.

Ток МДП-транзистора управляется, как и в лампе, напряжением. Поэтому основными усилительными параметрами, как и в лампе, являются крутизна и внутреннее сопротивление. Типичные величины S , S_1 в типовом режиме для транзистора ТН-12М показаны в табл. 1.

Зависимость крутизны от тока стока дана на рис. 7. Для некоторых функциональных назначений важным параметром является сопротивление затвора (R_2), которым фактически является сопротивление диэлектрического слоя.

Для обычных типов усилителей, особенно высокочастотных, эта величина не существенна, так как в конкретной схеме в цепи затвора транзистора существует гораздо меньшее шунтирующее сопротивление. Большая величина R_2 важную роль играет в электрометрических усилителях.

Такие усилители, как правило, характеризуются величиной входного тона (для МДП-транзистора величина входного тока составляет $10^{-10} + 10^{-13}$ а).

Таблица 1

Основные статистические параметры

Параметр	U_0 , в	$U_{зи}$, в		I_{a0} , а	I_c (начальный), а	S , ма/в	S_1 , мси
		> 0	< 0				
Разброс	$-(1,5 \pm 5)$	$0,4 \pm 1,4$	$-(0,2 \pm 1,9)$	$10^{-10} \pm 10^{-13}$		5 ± 8	$0,07 \pm 0,18$
Средняя величина	- 2,5	1,0	-1,0		$(1 \pm 5) \cdot 10^{-9}$	6,5	0,1
Режим измерения	$U_{си} = 10$ в $I_c = 10$ ма	$U_{си} = 10$ в $I_c = 5$ ма			$U_{си} = 10$ в $U_{зи} = -10$ в	$U_{си} = 10$ в $I_c = 5$ ма	

На рис. 8-II приводятся температурные зависимости ряда параметров.

Основные параметры

Предполагается выпускать приборы нескольких групп.

Основные параметры, по которым приборы разделяются на группы:

- напряжение на затворе (при котором ток стока равен 5 мА) больше или меньше 0;
- высокая крутизна (приборы предназначены для высокочастотных схем);
- ток затвора $\leq 1 \cdot 10^{-12}$ А (применение - электрометрические усилители).

В табл. I-3 приведены фактические параметры МДП-триодов ТН-12М, предназначенных в основном для высокочастотных схем, в табл. 2 - предельно допустимые электрические режимы эксплуатации.

Таблица 2

Предельно допустимые электрические режимы эксплуатации

Параметр	Условное обозначение	Единицы измерения	Предельная величина	Примечание
I	2	3	4	5
Максимально допустимое суммарное напряжение между затвором и стоком, затвором и источником	$U_{ас}$ $U_{аи}$	В	± 50 ± 50	
Максимально допустимое постоянное напряжение на стоке	$U_{си}$	В	20	
Максимальная температура окружающей среды	$t_{окр. макс}$	$^{\circ}C$	+125	

I2

I	2	3	4	5
Минимальная температура окружающей среды	$t_{окр. мин}$	$^{\circ}C$	-60	
Максимальное значение рассеиваемой мощности	P_c	мВт	150 50	при $t = +25^{\circ}C$ при $t = +125^{\circ}C$
Максимальное значение тока стока	I_c	мА	15 5	при $t = +25^{\circ}C$ при $t = +125^{\circ}C$

Таблица 3

Высокочастотные параметры

Параметр	S_{11} , мс/м	S_{22} , мс/м	C_{11} , пф	C_{22} , пф	C_{12} , пф	$K_{ш}$, дБ	K_p , дБ
Величина	0,31	0,5	5,0	3,5	0,2±0,6	446,5	13±18
Режим измерения	$U_{ш} = 15$ в $I_0 = 5$ ма $f_0 = 150$ МГц						$U_{см} = 10$ в, $I_0 = 5$ ма $f_0 = 250$ МГц

14

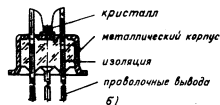
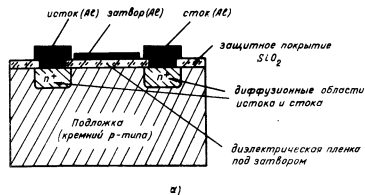


Рис. 1. Схема конструкции МДП-транзистора типа ТН-12М:

а) кристалл; б) ножка собранная

15

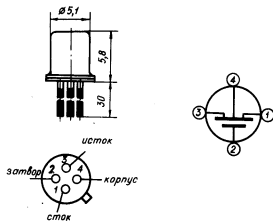


Рис. 2. Габариты, схема соединения электродов с выводами, цоколевка

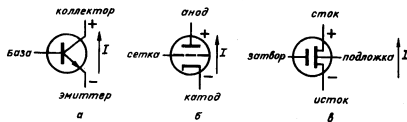


Рис. 3. Схематическое изображение:
а) биполярного транзистора $p-n-p$ -типа; б) вакуумного триода;
в) полевого МДП-транзистора с n -каналом

38762

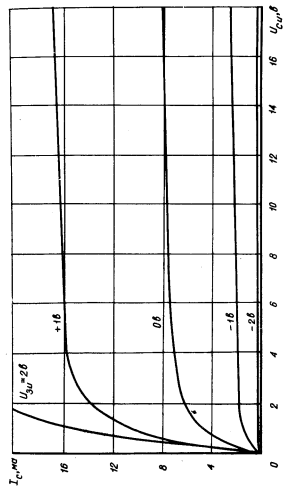


Рис. 4. Типовые выходные характеристики (для приборов, у которых ток стока 5 мА устанавливается при $U_G = 0$)

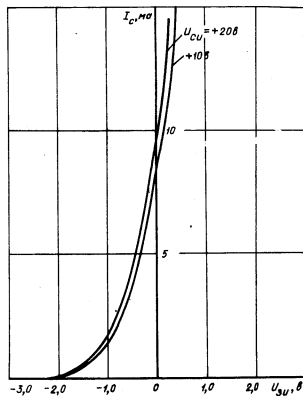


Рис. 5. Переходные характеристики полевых транзисторов с обеднением канала в рабочей точке ($I_C = 5$ мА):
режим испытания: $U_{CН} = \text{const}$

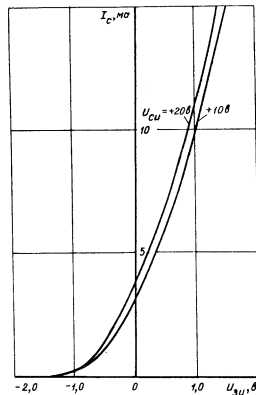


Рис. 6. Переходные характеристики полевых транзисторов с обогащением канала в рабочей точке ($I_C = 5$ мА):
режим испытания: $U_{CН} = \text{const}$

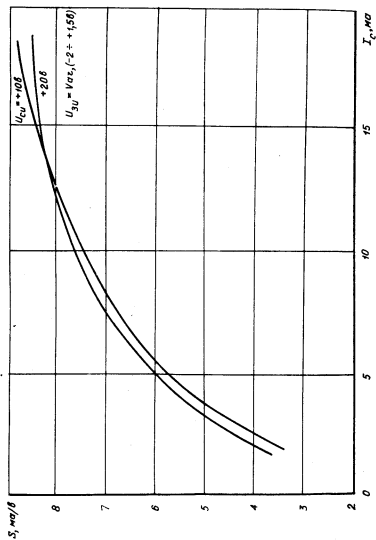


Рис. 7. Зависимость крутизны от тока стока при постоянном напряжении на стоке

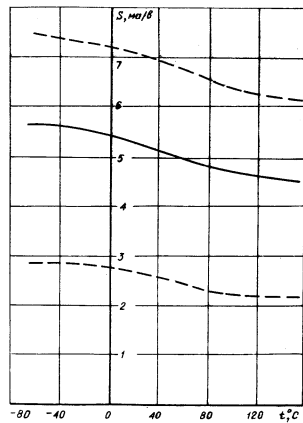


Рис. 8. Зависимость крутизны от температуры окружающей среды:
режим испытания: $U_{BE} = +10$ В, $I_C = 5$ мА; — типовое значение; --- границы 95% разброса

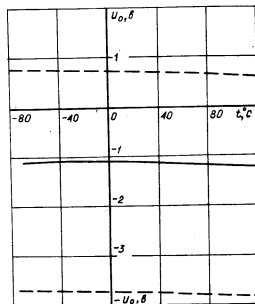


Рис. 9. Зависимость напряжения отсечки от температуры окружающей среды:
режим испытания: $U_{\text{сн}} = +10 \text{ В}$; $I_{\text{с}} = 10 \text{ мкА}$; — типовая зависимость; — — границы 95% разброса

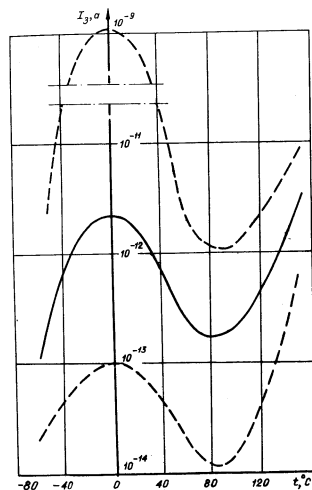


Рис. 10. Зависимость тока затвора от температуры окружающей среды:
режим испытания: $U_{\text{сн}} = +10 \text{ В}$, $I_{\text{с}} = 5 \text{ мА}$

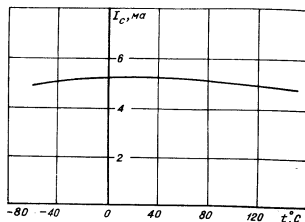


Рис. II. Зависимость тока стока от температуры окружающей среды:
режим испытания: $U_{CM} = +10$ В; $U_{BI} = \text{const}$

ОТЛАЧИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Высокочастотные свойства

Усилительные свойства нейтрализованного АДП-транзистора на высоких частотах определяются крутизной, входной и выходной проводимостями в соответствии с выражением

$$K_p = \frac{S^2}{4g_{11}g_{22}}$$

Стабильный коэффициент усиления не нейтрализованного каскада рассчитывается по формуле:

$$K_p = \frac{0,4S}{\omega C_{12}}$$

Если усиление оказалось больше, чем вычислено по последней формуле, то возможно возникновение генерации. В таком случае необходимо рассогласование входа или выхода с целью уменьшения коэффициента усиления до стабильной величины [5].

Предельная частота усиления (среднее значение) при условии $K_p = 1$, рассчитанная по вышеприведенным формулам, составила 550 МГц.

На рис. 12+15* показаны зависимости ряда ВЧ параметров от частоты и режима, измеренные по известным методикам [6, 7, 8].

* Иллюстрации см. в конце раздела.

Из рис. 12 видно, что ε_{22} равно ε_1 примерно до частот 50 МГц, а ε_{11} зависит квадратично от частоты в соответствии с выражением

$$\varepsilon_{11x} = \varepsilon_{110} \left(\frac{f_x}{f_0} \right)^2$$

Что касается проводимости обратной связи, то активная составляющая ε_{12} равна 0 практически во всем рабочем диапазоне частот в режиме насыщения и начинает проявляться лишь при значениях выше 100 МГц и при $U_{си} \leq 2$ в (см. рис. 13).

Изменение межэлектродных емкостей от частоты не наблюдается. Учитывая вышесказанное, а также данные работы [4], модуль крутизны для МДП-транзисторов приблизительно можно записать:

$$|y_{21} - y_{12}| = \varepsilon_{21} - j\omega C_{21} - \varepsilon_{12} + j\omega C_{12} \approx \varepsilon_{21} = S,$$

так, как $j\omega C_{21} \approx j\omega C_{12}$.

Таким образом, крутизна в рабочем диапазоне частот практически неизменна.

Характерной особенностью МДП-триодов является относительно слабая зависимость емкостей от напряжения на затворе и на стоке в рабочем диапазоне напряжений (см. рис. 14, 15).

Тек, входная емкость в зависимости от напряжения на затворе изменяется не более чем на 20% от напряжения отсечки до номинального режима ($I_0 = 5$ ма), а выходная C_{22} и проходная C_{12} остаются практически неизменными.

На рис. 16 приведены расчетные значения усиления мощности с нейтрализацией и без нейтрализации проходной емкости.

Исходя из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что в каскадах УВЧ наиболее целесообразны нейтрализованные схемы с ТН-12М, варианты которых и экспериментальные данные приводятся ниже.

Варианты схем нейтрализации проходной емкости (в разделе использованы материалы В.В.Горюхова)

Любая схема нейтрализации должна удовлетворять двум требова-

ниям. Эти требования таковы:

- полное устранение обратной связи;
- минимальное влияние на параметры схемы.

Схемы нейтрализации сводятся к трем типам: индуктивной, мостовой емкостной затворной, мостовой емкостной стоковой. Индуктивная нейтрализация и её эквивалентная схема приведены на рис. 17а, б. Параллельный контур, образованный индуктивностью нейтрализации и проходной емкостью транзистора, устраняет обратную связь на рабочей частоте усилителя.

Мостовая затворная нейтрализация и её эквивалентная схема показаны на рис. 17в, г. Схема применяется, когда необходимо обеспечить отсутствие прохождения $U_{вых}$ на вход.

Мостовая стоковая нейтрализация и её эквивалентная схема показаны на рис. 17д, е. Схема имеет большой диапазон настройки.

Для настройки контура нейтрализации последовательной емкостью (вариант первого способа - рис. 17а) с различными величинами $C_{эс}$ необходимо выполнять условие $C_{мин} \approx C_{эс мин}$. Схема пригодна лишь при нейтрализации транзисторов с малым разбросом $\frac{C_{эс макс.}}{C_{эс мин.}}$.

Схема нейтрализации параллельной емкостью (рис. 17а) имеет большой диапазон настройки, относительно большое $R_{ое}$, причём постоянное и независимое от $C_{пр}$.

Нейтрализованный УВЧ для УКВ диапазона

УВЧ собран по схеме с общим истоком, вход усилителя согласован с 75 ом, к.с.в. $\approx 1,4$. Нагрузкой УВЧ выбран резистор 10 ом, имитирующий на частоте $f_0 = 100$ МГц входное сопротивление каскада, выполненного также на МДП-транзисторе ТН-12М. Проверялось устойчивое усиление по напряжению при двух видах нейтрализации проходной емкости - индуктивной и мостовой.

При нейтрализации индуктивностью величина L_n составила

1,7 мкГн (рис. 18). При мостовой нейтрализации величина C_n составила порядка 4 пФ (рис. 19). В обоих случаях каскад УВЧ работал устойчиво даже при повышении напряжения на стоке до 30 В.

На рис. 20, 21 приведены графики зависимостей измеренного коэффициента усиления по напряжению (K_u) для 5 образцов транзисторов ($\beta = 445,6$ мА/В) в функции питающих напряжений. Анализируя приведенные характеристики, видно, что увеличение напряжения на стоке свыше 15В заметного улучшения K_u не дает, изменение же напряжения на затворе сказывается более существенно.

В испытательном режиме ($U_{си} = 15$ В, $I_c = 5$ мА) при индуктивной нейтрализации обеспечивается коэффициент усиления 35÷40 раз, при мостовой нейтрализации — 18÷30 раз.

Хотя при индуктивной нейтрализации устойчивый коэффициент усиления больше, чем при мостовой, последняя является частотнонезависимой и может с успехом применяться в перестраиваемых устройствах (например, в блоках УКВ радиовещательных приемников).

Характеристики перекрестной модуляции

В связи с резким увеличением количества радиопередатчиков различного назначения при радиоприеме связанных, телевизионных и радиовещательных станций возник ряд проблем, препятствующих качественному приему. Одной из этих проблем является перекрестная модуляция, которая может быть сведена к минимуму за счет определенной формы переходной характеристики входного активного элемента, в частности, квадратичной. Такой характеристикой обладает, как известно, полевые транзисторы, применение которых во входных каскадах позволяет резко уменьшить паразитное влияние перекрестной модуляции.

Оценка нелинейности характеристик полевых транзисторов проводилась методом измерения перекрестных искажений, возникающих в испытуемом триоде [9, 10]. Блок-схема измерения дана на рис. 22.

В основу измерений перекрестных искажений положено определение уровня модулированного сигнала помехи на входе испытуемого транзистора, достаточного для получения сигнала той же величины с выхода детектора, возникающего когда полезный сигнал на входе при отсутствии помехи обладает глубиной модуляции, составляющей K -часть глубины модуляции, приложенной к сигналу помехи, т.е.:

$$K = \frac{m_{лп}}{m_{пер}}$$

где $K_{пер}$ — коэффициент перекрестной модуляции;
 $m_{лп}$ — глубина модуляции полезного сигнала под влиянием помехи;

$m_{п}$ — глубина модуляции помехи.

Перекрестные искажения оценивались величиной $K_{пер} = 4\%$, хотя можно было бы использовать любое процентное соотношение. Обычно подбирают идеальный квадрат: 1, 4 или 9%, так как процентное отношение перекрестной модуляции $K_{пер}$ относят к квадрату напряжения помехи:

$$\frac{S}{S} = \frac{K_{пер}}{U_{п}^2}$$

где $U_{п}$ — эффективное напряжение помехи.

Частота полезного сигнала выбрана 465 кГц, частота сигнала помехи — 3 МГц (при такой частоте помехи практически исключено возникновение перекрестной модуляции в последующих каскадах). Уровень полезного сигнала для обеспечения линейного детектирования составлял 2 мВ, глубина модуляции помехи — 30%.

Типичные характеристики перекрестной модуляции МДП-транзисторов ТН-12М приведены на рис. 23. Как видно, для каждого образца наблюдается явно выраженный максимум $U_{п}$, достигающий уровня 0,5–1 В.

С целью выявления оптимального режима применения по перекрестной модуляции на рис. 24 для наглядности построены также зависимости коэффициента усиления по мощности (K_p), коэффициента шума (K_n), уровня помехи (для 1% перекрестной модуляции

(U_{π}) в функции тока стока при $U_{\pi} = \text{const}$. Зависимости K_p и K_{π} измерены в каскаде УВЧ, настроенном на частоту 100 МГц.

Параметры K_p , K_{π} и U_{π} при номинальном токе стока 5 мА и в оптимальном режиме по перекрестной модуляции:

Режим транзистора	K_p , дБ	K_{π} , дБ	U_{π} , В
Номинальный режим: $U_{\text{си}} = 10 \text{ В}$, $I_c = 5 \text{ мА}$	21	3,8	0,2
Оптимальный режим по перекрестной модуляции: $U_{\text{си}} = 10 \text{ В}$, $I_c \approx 1,2 \text{ мА}$	17	5	0,5

При необходимости обеспечить максимальную устойчивость к перекрестной модуляции транзисторы целесообразно использовать в режиме, соответствующем току порядка 1,2–1,5 мА, то есть четверти от номинального тока. Следует отметить, что при этом ухудшение параметров K_p и K_{π} незначительно.

Если необходимо обеспечить максимальное усиление, целесообразно использовать транзисторы при $I_c = (0,5+1) I_{c \text{ ном}}$, хотя при этом допустимый уровень помехи снижается до 0,2 в (тем не менее это значительно выше, чем для биполярных транзисторов).

Усилители постоянного тока
(По материалам В.Н.Семенова)

МДП-транзисторы по току затвора лучше полевых транзисторов с управлением через р-п-переход и соответствуют уровню электрометрических ламп.

Балансная схема повторителя (рис. 25) может быть рекомендована для вольтметров с входным сопротивлением порядка несколь-

ких гигаом на вольт. Дрейф во времени составляет $\sim 5 \text{ мВ/час}$. Схема устойчива к изменению напряжения питания, что важно при питании схемы от батарей. Экспериментальные результаты приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Дрейф нуля от изменения напряжения
в балансной схеме повторителя

$U_{\text{источника}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{источника}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{выхода}}, \text{ мВ}$
+6,3	+1,2	7,5
-6,3	+1,2	5,8
+6,3	-1,2	7,5
-6,3	-1,2	6,2

Таблица 5

Дрейф нуля во времени

$t, \text{ мин}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$	0	1,3	2,0	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	4,0	4,2	4,6

Схема электрометрического усилителя приведена на рис. 26. В схеме включено сопротивление обратной связи $R_{\text{об}}$ (рис. 26). Можно уверенно регистрировать ток 10^{-11} А , временной дрейф усилителя того же порядка, что и у повторителя (табл. 6, 7 и 8).

Таблица 6

Дрейф нуля от изменения напряжения
в схеме электрометрического усилителя

$U_{\text{источника}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{источника}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{выхода}}, \text{ мВ}$
+6,3	+1,2	7,5
-6,3	+1,2	5,8
+6,3	-1,2	7,5
-6,3	-1,2	6,2

Таблица 7

Дрейф нуля во времени ($R_{oc} = 10 \text{ Мом}$)

t, мин	0	5	10	15	20	30	40	50
U, мВ	0	0,8	1,2	2,0	2,3	2,5	2,5	2,5

Таблица 8

Дрейф нуля во времени ($R_{oc} = 1 \text{ гигаом}$)

t, мин	0	5	10	15	20	30	40	50
U, мВ	0	1,2	2,0	2,7	3,5	3,7	3,7	3,7

Так как полярность питания МДП-транзистора ТН-12М и электрометрических ламп одинакова, возможна простая переделка входных каскадов промышленных ламповых электрометрических усилителей.

Входные каскады УНЧ

Напряжение НЧ шума, приведенное ко входу, у МДП-триодов выше, чем у полевых триодов с управлением через р-п - переход (табл. 9), но следует отметить, что меньший ток затвора может дать значительный выигрыш по шумам (общего уровня), если сопротивление источника сигнала велико (сотни мегом - десятки гигаом).

Таблица 9

Шум транзистора в полосе 20 гц - 20 кГц

№ транзистора	U_w вх, мкВ
180	17
71	12

Продолжение таблицы 9

№ транзистора	U_w вх, мкВ
233	10
284	32
155	18
57	16
20	11
201	14
193	26
202	11
72	10
197	13
297	14,5

некоторые рекомендации по обращению с МДП-транзисторами ТН-12М

Аналогично СВЧ диодам типов ДИИ и ДКС полевые МДП-транзисторы подвержены пробоям от электростатического напряжения [12, 13].

При включении МДП-транзисторов в испытательную аппаратуру, а также в процессе испытания могут возникнуть условия, при которых на электрод затвора попадает электростатическое напряжение, способное вызвать пробой через диэлектрик между затвором и каналом. Монтажник, выполняющий любые операции с МДП-транзисторами, обладает емкостью определенной величины, и на нем может накапливаться заряд статического электричества. В результате потенциал монтажника относительно земли достигает даже нескольких киловольт.

У транзисторов ТН-12М пробой может наступить при наличии суммарного напряжения между затвором и истоком или затвором и истоком свыше ± 50 в. Даже кратковременное перенапряжение может привести к необратимому выходу прибора из строя (потере работоспособности).

Во избежание этого необходимы следующие меры:

- вся измерительная и испытательная аппаратура должна быть тщательно заземлена;
- перед измерением электрических параметров, испытанием, монтажом транзисторов в схему все четыре вывода транзистора должны быть объединены с помощью закорачивающего устройства;
- перед тем как взяться за транзистор, монтажник должен прикоснуться рукой к заземленному металлическому листу, на котором находится устройство с МДП-транзистором, или, что надежнее, с помощью проводника с кольцом (надеваемым на палец руки) заземлить себя (через сопротивление 100-500 ком). По возможности монтаж следует вести, надев на пальцы защитные резиновые колпачки;
- для пайки выводов МДП-транзисторов пользоваться паяльником с напряжением не выше 36 в, причём жало паяльника и ванночку с припоем следует надежно заземлить;
- после установки МДП-транзисторов в схему закорачивающее устройство убирается.

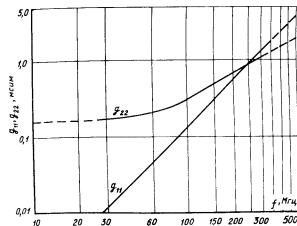


Рис. 12. Частотная зависимость входной и выходной проводимостей:

режим измерения: $U_{си} = 15$ в; $I_c = 5$ ма

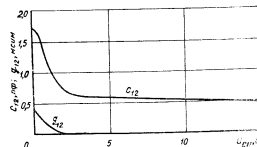


Рис. 13. Зависимость активной проводимости обратной передачи и ёмкости обратной связи от напряжения на стоке:

режим измерения: $U_{си} = const$; $f_0 = 100$ мкг

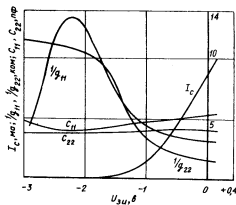


Рис. 14. Зависимость входных и выходных параметров от напряжения на затворе:
режим измерения: $U_{CU} = 15$ В; $f_0 = 150$ МГц

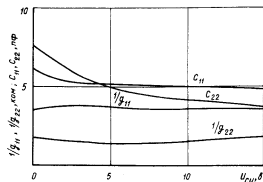


Рис. 15. Зависимость входных и выходных параметров от напряжения на стоке:
режим измерения: $U_{3H} = \text{const}$

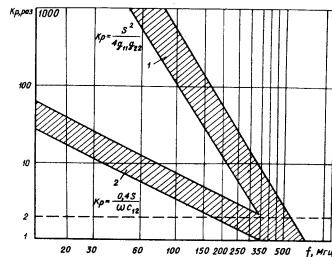


Рис. 16. Усилительные свойства в схемах с нейтрализацией (1) и без нейтрализации (2)

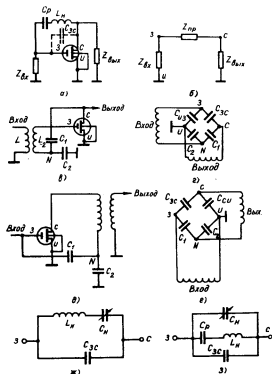


Рис. 17. Варианты схем нейтрализации емкости обратной связи

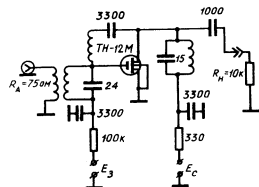


Рис. 18. Схема УВЧ с индуктивной нейтрализацией ($\tau_0 = 100$ МГц)

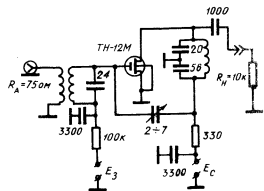


Рис. 19. Схема УВЧ с мостовой нейтрализацией ($f_0 = 100$ МГц)

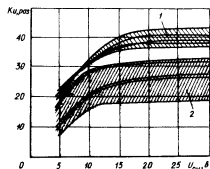


Рис. 20. Зона разброса K_u нейтрализованного УВЧ в функции U_{cy} :
 $f_0 = 100$ МГц; 1 - с индуктивной нейтрализацией; 2 - с мостовой нейтрализацией

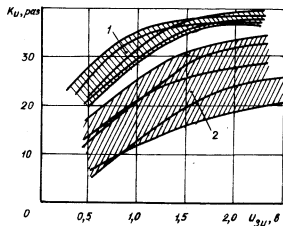


Рис. 21. Зона разброса K_u нейтрализованного УВЧ в функции U_{3y} :
 $f_0 = 100$ МГц; 1 - с индуктивной нейтрализацией; 2 - с мостовой нейтрализацией

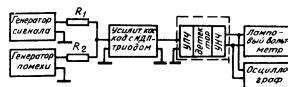


Рис. 22. Блок-схема измерения перекрёстной модуляции:

R_1, R_2 - развязывающие резисторы для источников сигнала и помехи с целью уменьшения взаимного гашущего действия генераторов

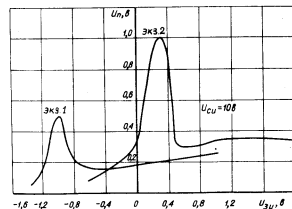


Рис. 23. Характеристики перекрёстной модуляции
 $(K_{пер} = 4\%)$

СХЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ

УКВ блок радиовещательного приемника
(По материалам А.Н.Киреева и В.И.Норкина)

Электрические параметры высокочастотных схем определяются значением параметров применяемых активных компонентов. В табл. 10 для сравнения с ТН-12М приведены некоторые ВЧ параметры лампы 6Н3П, биполярного транзистора ГТЗ13Б, а также американского полевого транзистора 2N3823, применяющихся в УКВ блоках радиовещательных приемников (для удобства сравнения параметры биполярного транзистора ГТЗ13Б даны в виде, принятом в ламповой технике).

Таблица 10

	Тип прибора	S, мВ	$f_0 = 70 \text{ МГц}$		C ₁₁ , пФ	C ₂₂ , пФ	C ₁₂ , пФ	Примечание
			$1/\varepsilon_{11}$, ком	$1/\varepsilon_{22}$, ком				
Лампа	6Н3П	5,9	11,2	6	2,7	1,55	1,6	включ. с общ. базой
Биполярный транзистор	ГТЗ13Б	30	0,05	2	44	1,75	0,25	
Полевой МДП-транзистор	ТН-12М	5+8	25+75	2,5+4,8	5,0	3,5	0,2+0,6	США
Полевой транзистор с управляющим p-n переходом	2N3823	3,5+6,5	9,2	10	6	2	1,5	

Из таблицы видно, что транзистор ТН-12М по крутизне не уступает другим активным компонентам (кроме ГТЗ13Б) при значительно большем входном сопротивлении и меньшей проходной емкости.

Следует отметить, что высокие входные и выходные сопротивления транзистора ТН-12М позволяет обеспечить полное выключение резонансных контуров.

На рис. 27 приведена принципиальная схема УКВ блока, в котором в каскадах УВЧ и смесителя применены МДП-транзисторы ТН-12М; гетеродин выполнен на биполярном транзисторе ГТЗ13Б. В схеме УВЧ применена нейтрализация проходной емкости транзистора. Коэффициент усиления по напряжению такого блока в диапазоне 66-78 МГц при $R_{\text{вх}} = 300 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 430 \text{ Ом}$ составил 15-27 раз, что соответствует усилению блока УКВ на биполярных транзисторах ГТЗ13Б; полоса пропускания по ПЧ и ослабление зеркального канала также находятся в пределах норм, предъявляемых к транзисторным блокам.

Помехозащищенность УКВ блока оценивалась по наличию и величине ослабления паразитных каналов (рис. 28). Для сравнения отметим, что в серийном транзисторном блоке на транзисторах ГТЗ13Б число паразитных каналов порядка 18.

Усилитель высокой частоты переключателя телевизионных каналов [14]

Принципиальная схема УВЧ показана на рис. 29. Каскад УВЧ нейтрализован, вход его согласован с 75 Ом. В этом каскаде получены следующие результаты.

Электрические параметры УВЧ

Параметр	Частота (МГц)					
	2	4	5	6	12	
Усиление, раз	59,25	86,25	98,25	175,25	223,25	
Коэффициент отражения	19	12	12	9,5	6,5	
Шумы (кТ ₀)	0,09	0,11	0,18	0,16	0,22	
	3,0	3,3	3,9	3,7	6,7	

Устойчивость к перекрестной модуляции (уровень помехи в милливольтах) для 1% перекрестной модуляции

№ ка-на-ла	Частота расстройки от $f_{\text{нес.изобр.}}$, МГц									
	-13,25	-15,25	-23,25	-25,75	-33,25	+16,75	+28,75	+27,75	+29,75	+41,75
4			300				130	160		
5	180		200				130			220
6		130		160			90			
12			200		205		220	280		

В схеме использован транзистор, имеющий в режиме $U_{\text{си}} = 10$ в, $I_{\text{с}} = 5$ ма следующие параметры:

$S = 8$ ма/в, $R_1 = 3,3$ Ком, $C_{\text{эс}} = 0,8$ пф.

Смесительный каскад ПТК [14]

Принципиальная схема смесителя на МДП-транзисторе ТН-12М с гетеродином на биполярном транзисторе приведена на рис.50. Режим транзистора подобран по максимальному коэффициенту преобразования: $U_{\text{си}} = 10$ в, $U_{\text{зи}} = -2,1$ в, $I_{\text{с}} = 5$ ма; $U_{\text{гет}} = 1,7$ в.эфф. На частоте четвертого канала ($f_{\text{нес.изобр.}} = 85,25$ МГц) получен коэффициент преобразования, равный 11. На частоте 12 канала ($f_{\text{нес.изобр.}} = 223,25$ МГц) при оптимальных $U_{\text{гет}} = 2,5$ в.эфф., $U_{\text{зи}} = -3$ в, $I_{\text{с}} = 5$ ма коэффициент преобразования получен 5,5.

Входной каскад усилителя промежуточной частоты изображения (УПЧИ) для телевизора [15]

На рис. 31 дана каскодная схема входного каскада УПЧИ на полевом и биполярном транзисторах: общий исток - общая база (ОИ-ОБ), где регулировка осуществляется по базе транзистора КТ315А. Режим полевого транзистора: $U_{\text{си}} = 4$ в, $I_{\text{с}} = 5$ ма, $U_{\text{зи}} = +0,7$ в. Максимальный коэффициент усиления 20 дБ. При перепаде регулирующего напряжения ($U_{\text{рег}} = 4,5$ в) глубина регулировки составляет 36 дБ.

Промежуточный каскад УПЧИ [15]

Схема промежуточного каскада УПЧИ (рис. 32) для обеспечения устойчивого усиления выполнена с нейтрализацией проходной емкости. Усиление такого каскада составило 13 дБ в полосе пропускания 7 МГц.

Выходной каскад УПЧИ [15]

Принципиальная схема каскада приведена на рис. 33. Каскад выполнен по каскодной схеме на биполярном транзисторе КТ315А с общей базой и на полевом транзисторе ТН-12М с общим истоком.

Такое соединение транзисторов обеспечивает весьма хорошую развязку входных и выходных цепей и устойчивое усиление. Режим работы полевого транзистора: $U_{\text{си}} = 6,5$ в, $I_{\text{с}} = 12$ ма, $U_{\text{зи}} = -0,5$ в. Усиление по напряжению составило 80 дБ, что примерно эквивалентно усилению каскодного оконечного усилителя на транзисторе 15А для телевизоров 3 класса.

Широкополосный усилитель

Широкополосный усилитель (рис. 34), выполненный на транзисторе ТН-12М (параметры: $S = 6 \text{ ма/в}$, $C_{\text{си}} = 4 \text{ пф}$, $C_{\text{си}} = 3,3 \text{ пф}$, $C_{\text{сб}} = 0,14 \text{ пф}$), обеспечивал коэффициент усиления 14 (раз) в полосе 7 МГц (рис. 35). С простейшей индуктивной коррекцией верхняя граничная частота составила 10 МГц.

Аттенкатор

На рис. 36 показана зависимость сопротивления цепи стока от тока в функции напряжения на затворе. Следует отметить, что в основной части диапазона управляющих напряжений (от -2,5 в до 0) эта зависимость близка к линейной.

Преимуществом, вытекающим из применения МДП-транзистора в качестве аттенкатора, является практическое отсутствие потребления мощности в цепи управления. Важным достоинством такого аттенкатора является то, что через канал не протекает постоянный ток. Хотя сопротивление канала может меняться в пределах сотен тысяч раз, полное использование такого изменения нецелесообразно из-за частотных и нелинейных искажений.

На рис. 37 показана схема простейшего аттенкатора с МДП-транзистором ТН-12М в качестве переменного сопротивления. Схема функционирует правильно, если после аттенкатора установлен нагруженный элемент с большим входным сопротивлением, например, усилитель, выполненный также на МДП-транзисторе, включенном по схеме с общим истоком. Эта схема обеспечивает ослабление сигнала 60-65 дБ. Такие аттенкаторы более удобны, чем аналогичные схемы на биполярных транзисторах: они могут работать при амплитудах напряжений, достигающих примерно половины напряжения отсечки, в то время как для биполярных транзисторов амплитуда составляет малые доли вольта. Такая схема может работать в качестве регулятора громкости, в усилителях с АРУ, в устройствах автоматического управления и т.д.

Истоковый повторитель (По материалам В.И.Глушкова и В.Н.Семенова)

Истоковый повторитель (рис. 38) представляет собой двухтактный усилитель со 100-процентной обратной связью. В схеме обеспечивается коэффициент передачи 0,95 с верхней граничной частотой 35 МГц; входная емкость схемы составила порядка 0,5 пф, выходное сопротивление 30-70 ом.

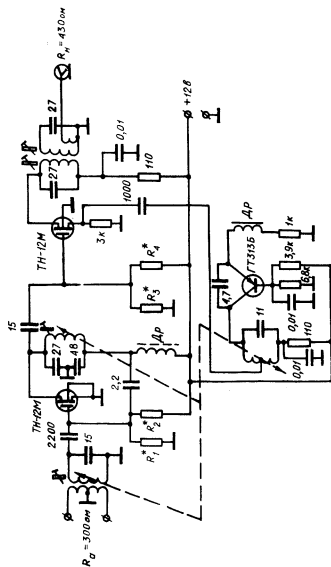
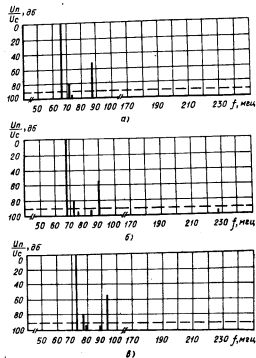


Рис. 27. Принципиальная схема УКВ-блока для радиовещательного приемника



28. Паразитные каналы приема УКВ-блока при напряжении сигнала 10 мкВ):
 а) $f_0 = 66$ МГц; б) $f_0 = 69$ МГц; в) $f_0 = 73$ МГц

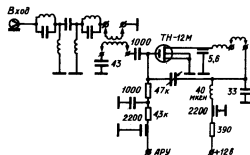


Рис. 29. Схема усилителя высокой частоты переключателя телевизионных каналов

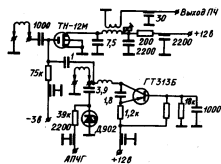


Рис. 80. Принципиальная схема смесительного каскада и гетеродина ПТК

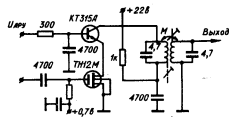


Рис. 31. Схема выходного каскада УЛЧИ

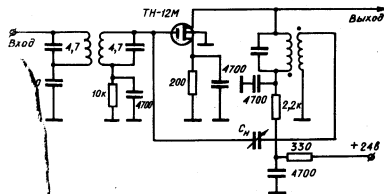


Рис. 32. Схема промежуточного каскада УЛЧИ

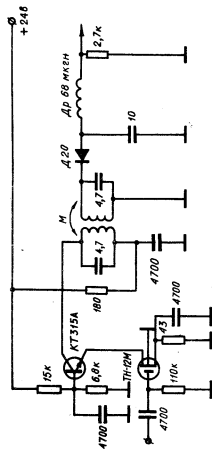


Рис. 33. Схема выходного каскада УПЧИ

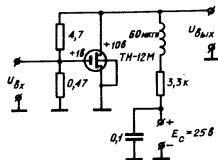


Рис.34. Принципиальная схема широкополосного усилителя

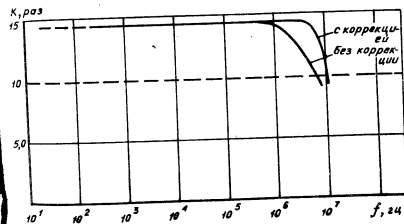


Рис. 35. Частотная характеристика широкополосного усилителя

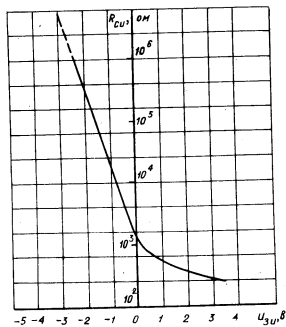


Рис. 36. Зависимость сопротивления участка сток-исток от напряжения на затворе

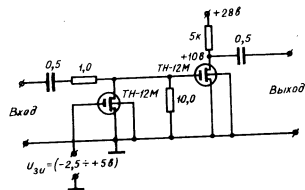


Рис. 37. Принципиальная схема аттенюатора

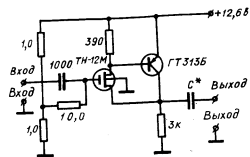


Рис. 38. Схема истокового повторителя:
величина C^* подбирается в зависимости от требуемой нижней граничной частоты

1. Степаненко И.П., Зайцев Б.Д. "Известия вузов СССР - радиоэлектроника", 1969, том XII, № 4.
2. Кроуфорд Р. Схемные применения МОП-транзисторов, М., "Мир", 1970.
3. Вальков А.А., Толчилов Н.А., Колосовский А.В. Кремниевые полевые транзисторы типов 2П102 и К1П102 (ТН-1). Заочный семинар: Тенденции развития активных радиокомпонентов малой мощности. ЦНТИ, Новосибирск, 1969.
4. "Nachrichtentechnik", 1966, N 12.
5. "Электроника", 1964 (перевод), том 37, № 31.
6. Степанов И.В., Кутодин С.А., Антонов М.И., Телмен Г.Н. "Электронная техника", серия 12, 1970, вып. 5.
7. Антонов М.И. Обследование высокочастотных и шумовых свойств полевых транзисторов. Технический отчет, 1969.
8. Антонов М.И. Высокочастотные параметры полевых транзисторов и методы их измерения. Обзор, 1968.
9. Киреев А.Н. "Электронная техника", серия 5, 1968, вып. I(9).
10. Киреев А.Н. Характеристики перекрестной модуляции полевых транзисторов. Обзор, 1968.
11. Киреев А.Н. Оптимальные режимы применения МОП-транзисторов ТН-12 и ТН-11 во входных высокочастотных усилителях. ИСЛ № 001202, МЭП СССР, 1970.
12. Полупроводниковые диоды. Параметры и методы измерений. М., "Сов. радио", 1968.
13. "Radio Mentor Elektronik", N.11, S. 867-873, 1967; N. 12, S. 940-945, 1967.
14. Применение полевых транзисторов в селекторах телевизионных каналов. Протокол исследования. КРЗ, Каунас, 1970.
15. Исследование целесообразности применения полевых транзисторов в каскадах УПЧИ. Технический отчет МНТИ, М., 1970.

Основные преимущества полевых МДП-транзисторов перед другими активными элементами.....	4
Основные области применения МДП-триодов.....	5
Условные обозначения.....	6
Конструкция, основные электрические параметры и характеристики	
Устройство полевого транзистора типа ТН-12М.....	8
Принцип работы n-канального МДП-транзистора.....	9
Статические характеристики.....	10
Основные параметры.....	12
Отличительные свойства и особенности применения	
Высокочастотные свойства.....	25
Варианты схем нейтрализации проходной емкости.....	26
Нейтрализованный УВЧ для УКВ диапазона.....	27
Характеристики перекрестной модуляции.....	28
Усилители постоянного тока.....	30
Входные каскады УНЧ.....	32
Некоторые рекомендации по обращению с МДП-транзисторами ТН-12М.....	33
Схемы применения	
УВЧ блок радиовещательного приемника.....	44
Усилитель высокой частоты переключателя телевизионных каналов.....	45
Смесительный каскад ПТК.....	46
Входной каскад усилителя промежуточной частоты изображения (УПЧИ) для телевизора.....	47
Промежуточный каскад УПЧИ.....	47
Выходной каскад УПЧИ.....	47
Широкополосный усилитель.....	48
Аттенуатор.....	48
Источковый повторитель.....	49
Литература.....	58

Отвественный за выпуск Н.А.Толчилов
Редактор Э.Н.Прибытова
Технический редактор Л.П.Минска
Корректор Э.М.Ержева

МН 02582. Подписано к печати 26/II-71. Формат бумаги
60x84/16. Уч.-издательских л. 3,24. Печатных л. 3,75. Тираж
3000. Заказ № 341. Цена 23 коп. 1971 г.

Цена 23 коп