

УСТРОЙСТВА ФОРМИРОВАНИЯ И ГЕНЕРИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

ПОМЕХИ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Методическая разработка

САРАНСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2014

УДК 621.396

Составители *В.М. Бардин, А.В. Земсков*

Рецензент – кандидат технических наук, доцент *Н.Н. Беспалов*

Устройства формирования и генерирования сигналов. Помехи радиопередающих устройств: метод. разработка / сост. В.М. Бардин, А.В. Земсков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – 16 с.

Рассмотрены вопросы, связанные с изучением одного из разделов курса «Устройства формирования и генерирования радиосигналов».

Предназначено для студентов специальности «Радиотехнические системы и комплексы», но может быть полезно для студентов других специальностей при изучении вопросов, связанных с радиотехникой.

Печатается по решению научно-методического совета Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва.

Учебное издание

УСТРОЙСТВА ФОРМИРОВАНИЯ И ГЕНЕРИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

ПОМЕХИ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Методическая разработка

Составители: **БАРДИН Вадим Михайлович**
ЗЕМСКОВ Антон Владимирович

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое издание является продолжением серии подобных изданий, предназначенных для студентов специальности «Радиотехнические системы и комплексы», изучающих курс «Устройства формирования и генерирования радиосигналов». В методической разработке рассматриваются причины возникновения в радиопередатчиках различных помех и способы борьбы с этим явлением. Обеспечение требований по электромагнитной совместимости радиопередатчиков является обязательным, однако их выполнение требует понимания происходящих в передатчике явлений.

Содержание методической разработки дополняет соответствующий раздел лекционного курса и позволяет более глубоко вникнуть в суть проблемы.

1. Проблема электромагнитной совместимости радиопередатчиков

При работе мощных каскадов передатчика в режиме второго рода (с отсечкой тока), а также в процессе регулировки или настройки каскадов, изменении питающих напряжений, при неудачной конструктивной компоновке блоков и по целому ряду других причин в передатчиках могут возникать различные нежелательные явления. В частности, появление на выходе усилителей мощности паразитных колебаний даже при отсутствии каких-либо сигналов на входе. Эти колебания могут иметь различные частоты, сложную форму, значительную амплитуду. Взаимодействуя с основным сигналом, они существенно искажают закон полезной модуляции, приводят к излучению паразитных сигналов в эфир, в цепях активных элементов начинают протекать токи и действовать напряжения значительно превышающие расчетные значения. Это может стать причиной повреждения полупроводниковых приборов и отказа передатчика.

Все эти процессы приводят к тому, что на выходе передатчика наряду с основными существуют колебания, частоты которых лежат за пределами полосы спектра полезного сигнала или накладываются на этот спектр.

Поскольку каждому передатчику в соответствии со стандартами отводится определенная полоса частот, то все колебания, выходящие за эту полосу должны быть подавлены. Причем степень подавления должна быть не хуже – 60÷120 дБ. В этом и состоит проблема обеспечения электромагнитной совместимости.

2. Побочные и внеполосные излучения передатчиков

Все колебания искажающие спектр полезного сигнала принято делить на побочные и внеполосные. Побочные колебания располагаются достаточно далеко от рабочей полосы частот и обусловлены, как правило, работой

электронных приборов с отсечкой тока. В этом случае в выходном токе ГВВ появляются гармоники кратные частоте несущего колебания. Наибольшую амплитуду имеют вторая и третья гармоники. Подавление второй и других четных гармоник можно обеспечить применением двухтактных усилителей. А третья гармоника и все нечетные подавляются, если угол отсечки тока в усилителе равен 90° . Ну и конечно, для подавления любых гармоник применяются полосовые фильтры. Внеполосные колебания обусловлены, в основном, нелинейностью модуляционной характеристики, нелинейными искажениями сигнала в каскадах передатчика, а также наличием в тракте передатчика умножителей частоты. В результате происходит паразитная модуляция полезного сигнала и в его спектре появляются дополнительные составляющие. Внеполосные колебания находятся вблизи рабочей полосы частот или даже внутри ее и поэтому колебательные цепи их не отфильтровывают. Единственный путь к их снижению – правильный выбор электронных приборов и режима их работы.

Если в тракте передатчика присутствует умножитель частоты, то при работе усилителей в нелинейном режиме в спектре сигнала могут появляться гармоники, связанные с несущей частотой кратными соотношениями $\frac{\omega_0}{N}$, $\frac{2\omega_0}{N}$, $\frac{3\omega_0}{N}$ (рис.1). А если в передатчике есть несколько умножителей частоты, то в спектре могут появиться гармоники, кратные произведению коэффициентов умножения.

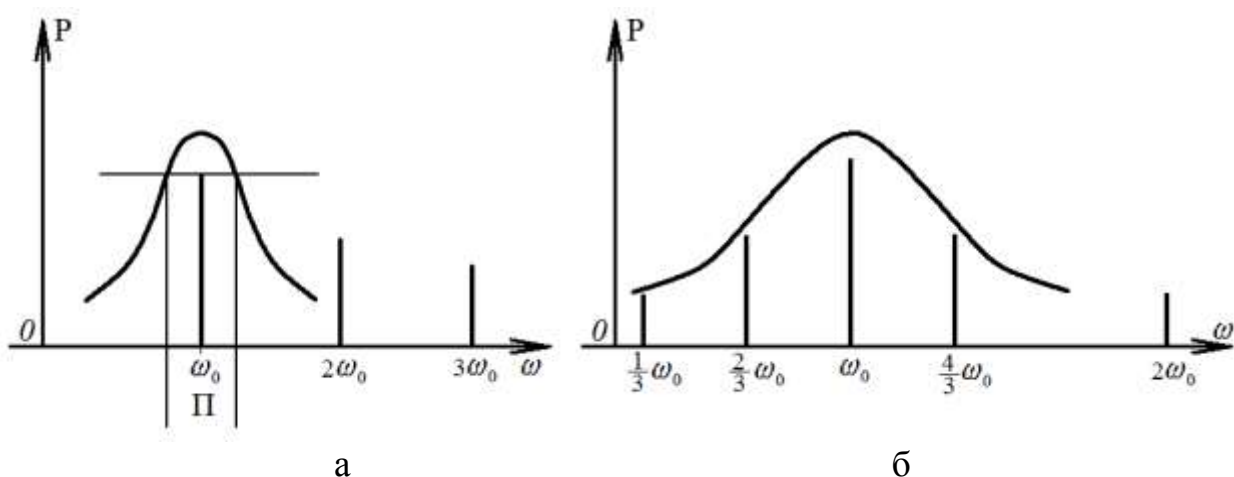


Рис. 1. Расположение внеполосных (а) и побочных составляющих (б), при $N = 3$

При наличии умножителей частоты подавление побочных составляющих на их выходе может быть обеспечено только применением эффективных фильтров.

Кроме гармонических колебаний, так или иначе связанных с основной частотой передатчика в нем могут возникать так называемые паразитные колебания, связанные с неустойчивой работой отдельных каскадов. Причем формы и частоты этих колебаний могут быть самыми разнообразными. Такие паразитные колебания, взаимодействуя с основными, могут изменять все показатели передатчиков.

В передатчиках СВЧ диапазона помехи излучения могут существовать и за счет шумовых свойств активных элементов.

Понятно, что борьба с появлением помех различного вида требует понимания причин и механизмов их возникновения, которые далеко не всегда являются очевидными. На рассмотрении некоторых из этих причин мы и остановимся.

3. Причины появления паразитных колебаний в ГВВ

В большинстве случаев паразитное возбуждение возникает за счет положительной обратной связи, которая может появляться из-за схемотехнических и конструктивных ошибок. В ряде случаев положительная обратная связь вводится специально, например, при построении автогенераторов, систем стабилизации или регулирования параметров (частоты, амплитуды, фазы).

Поясним причины и механизмы возникновения побочных и внеполосных колебаний. При работе усилителей мощности передатчика в режимах второго рода (с отсечкой тока) форма тока протекающего через усилительный элемент перестает быть синусоидальной, а приобретает форму косинусоидальных импульсов с определенным углом отсечки θ (рис.2).

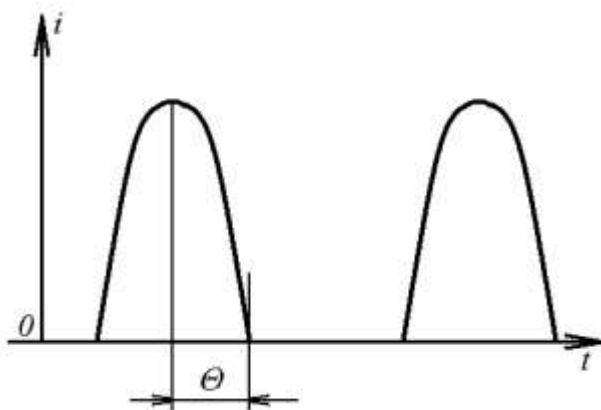


Рис.2. Косинусоидальная форма импульсов с определенным углом отсечки

Такую последовательность импульсов в соответствии с теорией разложения Фурье можно представить в виде суммы постоянной составляющей и ряда гармонических составляющих разных частот:

$$i_{\text{вых}} = I_0 + I_1 \cos \omega t + I_2 \cos 2\omega t + \dots + I_n \cos n\omega t, \quad (1.1)$$

где $I_0 = \alpha_0 I_m$, $I_1 = \alpha_1 I_m$, ..., $\alpha = f(\Theta)$ – коэффициенты разложения, I_m – амплитуда импульса тока.

Так при угле отсечки тока $\Theta = 90^\circ$ коэффициенты разложения имеют следующие значения: $\alpha_0 = 0.32$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.2$, ... и спектр выходного тока генератора будет иметь вид (рис.3).

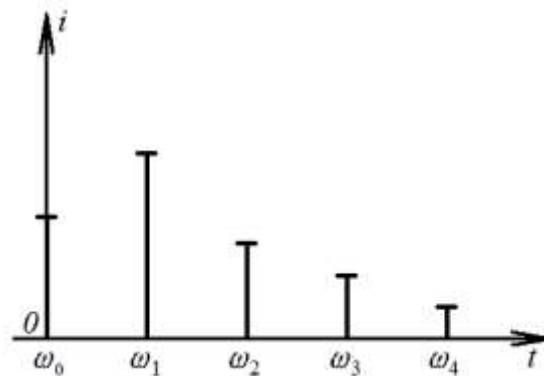


Рис.3. Спектр выходного тока генератора

Понятно, что полезной составляющей в этом спектре является только первая, а все остальные – это побочные помехи.

Внеполосные помехи обычно появляются в каскадах умножения частоты. Новые частоты, кратные исходной, можно получить только на нелинейных элементах. В качестве таких элементов используются транзисторы, диоды, варикапы. Транзисторный умножитель частоты по сути представляет собой ГВВ работающий в режимах «В» или «С», т.е. с отсечкой тока.

На выходе умножителя устанавливается колебательный контур, настроенный на требуемую гармонику. Контур должен иметь высокую добротность, чтобы снизить в выходном колебании напряжение с частотой возбуждения и других побочных гармоник. Поскольку полностью подавить побочные колебания удастся не всегда, то на вход следующего каскада поступает напряжение основной частоты и частоты побочных составляющих, которые накладываются друг на друга, т.е. происходит модуляция. В результате могут появиться дробные составляющие $\frac{\omega_0}{3}$, $\frac{2\omega_0}{3}$, $\frac{4\omega_0}{3}$ находящиеся вблизи рабочей частоты ω_0 и по сути являющиеся помехами.

Но она может возникать в транзисторных и ламповых каскадах из-за наличия реактивных составляющих между электродами этих элементов, а также из-за недостаточной экранировки цепей или плохой развязки каскадов по цепям питания.

В чем состоит основная причина возникновения паразитных колебаний в усилительных каскадах?

Известно, что комплексная передаточная функция W усилителя с одной петлей обратной связи описывается выражением:

$$W = \frac{K}{1 - K\beta} = \frac{K}{1 - T}, \quad (1.2)$$

где $K = K(j\omega)$ – направленная от входа к выходу передаточная функция цепи прямой передачи; $\beta = \beta(j\omega)$ – направленная от выхода к входу комплексная передаточная функция цепи обратной связи.

Произведение $K\beta = T$ называется петлевым усилением или возвратным отношением. Величина $1 - T$ называется возвратной разностью.

Из приведенной формулы следует, что при $T \approx 1$ обратная связь может вносить сколь угодно большое увеличение модуля передаточной функции. При $T = 1$ система не может быть устойчивой. Поэтому для обеспечения устойчивости необходимо обеспечить условие $|T| < 1$ для всех частот в диапазоне $0 \leq f \leq \infty$.

В любой устойчивой линейной системе с постоянными параметрами появление обратных связей приводит к изменению АЧХ, ФЧХ, усиления, входной и выходной проводимостей и всех других параметров и функций системы. В ГВВ петля обратной связи всегда имеет сложную характеристику T и всегда может оказаться частота, на которой $T \approx 1$ и на АЧХ появляется острый пик, что может стать серьезным препятствием при создании высокочастотных усилителей с большим усилением и требуемой АЧХ. Цепи паразитной обратной связи почти всегда образуются пассивными элементами, по которым сигнал может проходить не только с выхода на вход, но и в прямом направлении со входа на выход, даже при запертом электронном приборе, что в большинстве случаев является крайне вредным явлением.

В устойчивой нелинейной системе, которую представляет собой ГВВ в режимах усиления больших сигналов с отсечкой, насыщением, в перенапряженном режиме в дополнении к следствиям, указанным для линейных режимов, обратная связь может вызвать переход в нежелательный режим, например, из недонапряженного в перенапряженный при усилении АМ сигналов, в недонапряженный при коллекторной (или анодной) амплитудной модуляции. В обоих случаях такой переход сопровождается увеличением нелинейных искажений.

Кроме того, при усилении больших сигналов с переменной амплитудой в транзисторных усилителях могут изменяться входная и выходная комплексная проводимость, проходная емкость, граничная частота, коэффициент усиления. Эти изменения также могут привести к нежелательным последствиям.

Нормальная работа усилителей возможна только при достаточном запасе устойчивости и малой чувствительности функций к изменению параметров активных элементов. Очевидно, что если обеспечить $|T| \ll 1$ для всех $0 \leq f \leq \infty$, то условия устойчивости будут выполнены с запасом. Уменьшение $|T|$ связано с применением активных элементов с малыми внутренними реактивностями, эффективной развязкой и экранированием входа и выхода ГВВ, снижением усиления и другими мерами. Обычно рекомендуют величину $|T|$, ограничивать пределами $0.2 \leq |T| \leq 0.5$.

Если в каскадах присутствует отрицательная обратная связь, например в эмиттерном повторителе, в схеме усилителя с общей базой или других способах введения ООС, то требования к величине $|T|$ можно несколько снизить.

Поясним механизм возникновения паразитных положительных обратных связей на примере транзисторного ГВВ. На рис.4 приведена схема ГВВ с отображением всех паразитных элементов.

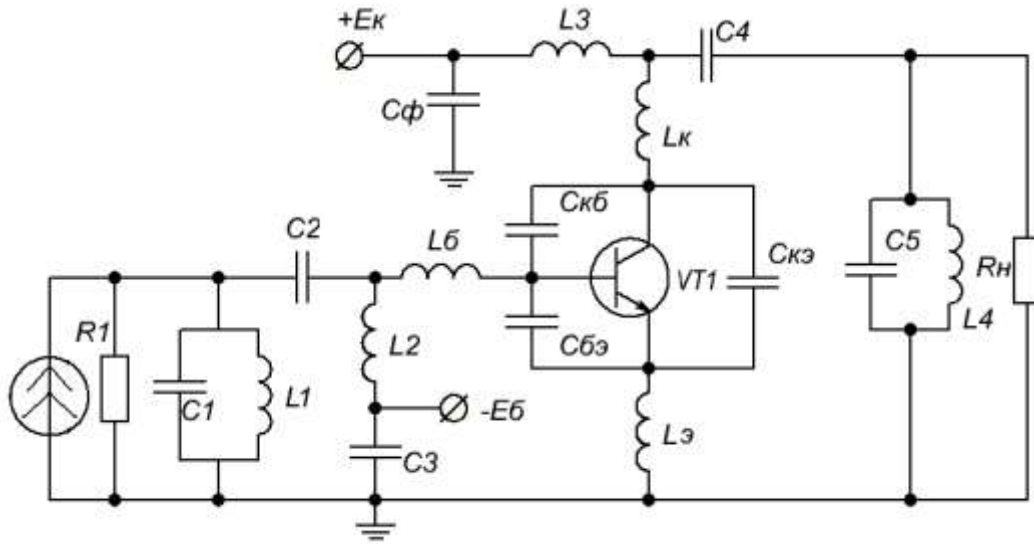


Рис.4. Схема транзисторного ГВВ с учетом паразитных элементов (связей)

В этой схеме L_1, C_1 и L_4, C_5 образуют рабочие колебательные контуры, L_2, L_3 – дроссели, C_2, C_4 – разделительные конденсаторы, $C_3, C_ф$ – блокировочные конденсаторы, элементы $C_{кб}, C_{бэ}, C_{кз}$ – межэлектродные емкости, $L_к, L_э, L_б$ – индуктивности выводов и соединительных проводников.

Эта схема сложна для анализа, поскольку имеет множество частных резонансов. Если предположить, что частоты таких частных резонансов имеют большой разнос и не взаимодействуют друг с другом, то можно рассматривать аналоги этой схемы для трех диапазонов частот: существенно ниже рабочей, в зоне рабочих частот и существенно выше рабочих.

В диапазоне частот намного меньших рабочей, схема приобретает вид рис.5.

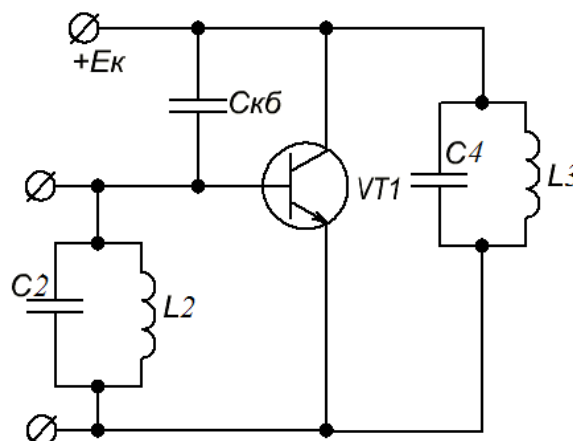


Рис.5. Эквивалентная схема ГВВ для низких частот

Эта схема может самовозбуждаться на частотах $\omega_r < \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ и $\omega_r < \frac{1}{\sqrt{L_3 C_4}}$,

когда реактивности контуров носят индуктивный характер и схема превращается в автогенератор по схеме индуктивной трехточки. Такие автоколебания называются дроссельными, поскольку частота автогенерации определяется индуктивностями дросселей. Поскольку в транзисторных ГВВ в цепи базового смещения обычно вместо дросселя включается резистор, то вероятность возникновения таких автоколебаний невелика.

В зоне рабочих частот эквивалентная схема ГВВ приобретает вид, изображенный на рис.6.

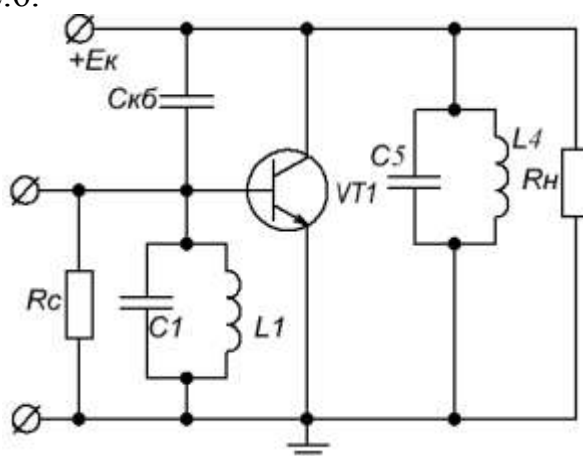


Рис.6. Эквивалентная схема ГВВ для зоны рабочих частот

При настройке контуров на рабочую частоту эта схема может быть неустойчивой на частоте несколько ниже рабочей, но в пределах полосы пропускания контуров.

В диапазоне частот много больше рабочей основную роль начинают играть индуктивности выводов и монтажа и межэлектродные емкости. В результате эквивалентная схема приобретает вид рис.7а.

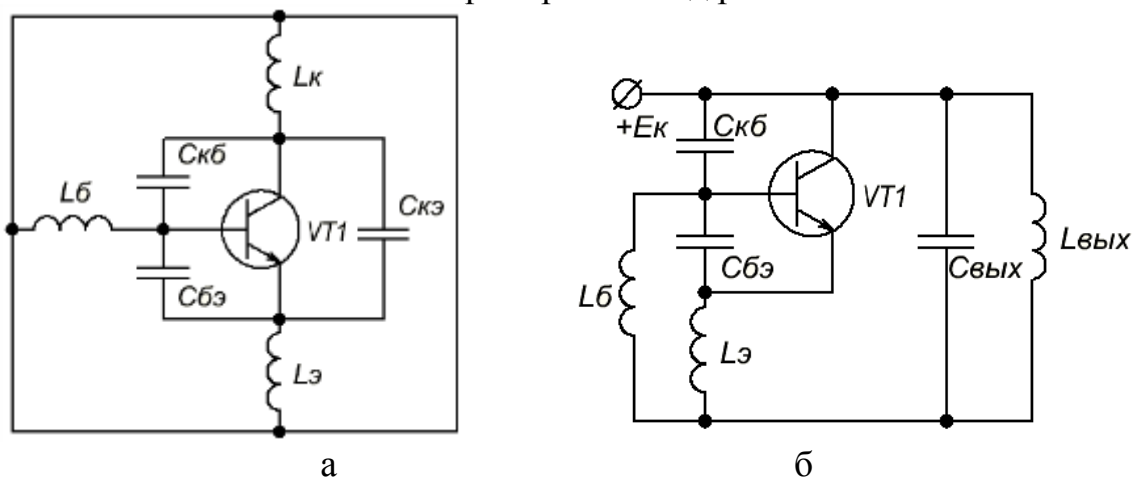


Рис.7. Эквивалентная схема ГВВ для зоны частот много больших рабочей

Частота паразитных колебаний в такой схеме определяется индуктивностью вывода коллекторной цепи L_k и выходной емкостью каскада $C_{\text{вых}}$.

Эту схему можно рассматривать как двухконтурный автогенератор (рис.7б) выходной, контур которого образован элементами $L_{\text{вых}}$, $C_{\text{вых}}$, а входной – элементами $L_6 + L_9$ и C_{69} . На частоте возможной генерации оба контура должны иметь индуктивное сопротивление, а сама схема представлять собой индуктивную трехточку.

4. Способы повышения устойчивости ГВВ

Эффективным способом ослабления обратной связи через проходную емкость является нейтрализация, понять действие которой проще на примере двухтактной схемы.

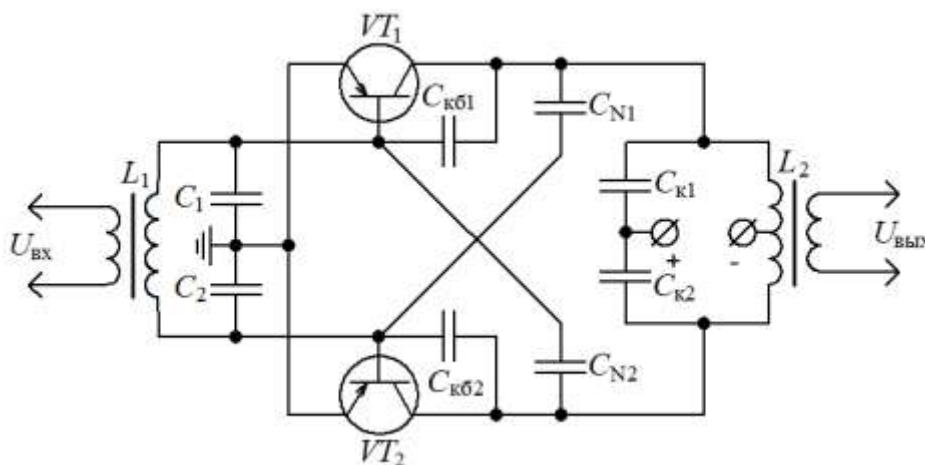


Рис.8. Двухтактная схема усилителя мощности

В такой схеме напряжение на коллекторах транзисторов противофазны, поскольку, когда открыт один транзистор, другой оказывается запертым. На базу каждого транзистора при таком соединении поступает не только напряжение положительной обратной связи через емкость $C_{кб}$, но и противофазное ему напряжение с коллектора второго транзистора через нейтрадинную емкость C_N . Если эти напряжения будут равны по модулю, то действие паразитной положительной обратной связи будет полностью нейтрализовано. Но для этого требуется подобрать необходимую емкость нейтрадинного конденсатора.

В однотактных схемах нейтрализацию паразитной обратной связи можно обеспечить путем введения дополнительной обратной связи с выхода на вход путем включения фазосдвигающей цепочки. Один из возможных вариантов такого решения приведен на рис.9.

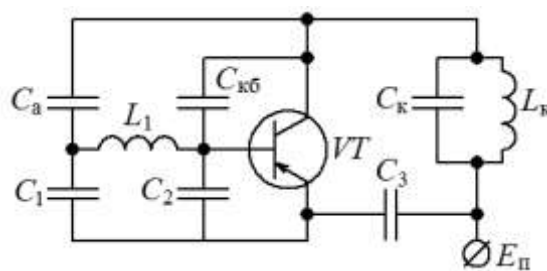


Рис.9. Однотактная схема усилителя мощности

Проблема обеспечения устойчивости ГВВ еще больше обостряется в многокаскадных усилителях, в которых появляются дополнительные паразитные цепи положительной обратной связи. Они образуются через внешние монтажные емкости и цепи источников питания. С увеличением числа каскадов величина общего возвратного отношения T и его влияния на все функции усилителя возрастает не в арифметической, а в геометрической прогрессии. Поэтому в многокаскадных усилителях с большим усилением и без каскадов умножения или преобразования частоты следует снижать не только связь с выхода всего усилителя на его вход, но и возвратное отношение в каждом каскаде.

5. Шумовые помехи в ГВВ

В передатчиках УКВ и СВЧ диапазонов могут возникать помехи шумового характера. Флуктуации токов и напряжений в активных элементах передатчика создает шумовой спектр помехи с определенной спектральной плотностью. Эти явления характерны для маломощных усилителей. При подаче на ГВВ напряжения возбуждения изменяется как величина рабочего тока, например тока коллектора транзистора, так и величина шумового тока.

Отношение шум/сигнал в усилителях обратно пропорционален току транзистора. Например, при $I_k = 10 \text{ мА}$ фактор шума $\rho_{ш} \approx 2 \cdot 10^{-17} \Gamma_{ц}^{-1} = -167 \frac{\partial \text{Б}}{\Gamma_{ц}}$.

Т.е. мощность шума усилителя в полосе 1 Гц при малых расстройках относительно ω_0 на 167 дБ ниже мощности основного сигнала. Это очень незначительная величина. Но при прохождении сигнала с шумом через последующие нелинейные цепи (например, умножители частоты) уровень шума может увеличиться. Например, при умножении частоты в 100 раз уровень шума на выходе передатчика возрастает почти на 40 дБ и будет составлять уже $-127 \frac{\partial \text{Б}}{\Gamma_{ц}}$. Увеличение составляющей шума в спектре передатчика создает дополнительные сложности при приеме сигнала.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит проблема обеспечения ЭМС радиопередатчиков?
2. Что является причинами возникновения внеполосных и побочных колебаний?
3. Основная причина появления паразитных колебаний. Что такое возвратное отношение в ГВВ?
4. Какие цепи в ГВВ участвуют в создании паразитных обратных связей?
5. Приведите эквивалентную схему ГВВ для зоны рабочих частот и объясните почему усилитель может потерять устойчивость.
6. Как в ГВВ можно нейтрализовать действие положительной обратной связи?
7. Что понимается под шумовыми помехами ГВВ?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Радиопередающие устройства: учебник для студентов вузов по спец. «Радиосвязь», «Радиовещание», «Телевидение». 3-е изд., перераб. и доп. / В.В. Шахгильдян и др. М.: Радио и связь, 1996. 560 с.
2. Воронин А.А. Шумовые излучения радиопередающих устройств, чем они опасны // Информост. Радиоэлектроника и телекоммуникации.-2004.- №4(34).
3. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов / Л.А. Белов, М.В. Благовещенский, В.М. Богачев и др.; Под ред. М.В. Благовещенского, Г.М. Уткина. М.: Радио и связь, 1982. 408 с.
4. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов связи / Л.Е. Клягин, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.; Под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Связь, 1980. 328 с.