

## О НЕКОТОРЫХ ЭФФЕКТАХ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ В ВЫХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ УКВ РАДИОСТАНЦИЙ

*Водчиц А.А.<sup>1</sup>, аспирант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Козлов С.В. – доктор технических наук*

**Аннотация.** В работе приведены практические сведения об интермодуляционных искажениях, возникающих между одновременно работающими в режиме передачи радиостанциями. На примере экспериментально исследуемого радиочастотного усилителя показаны зависимости уровня интермодуляционных искажений от частоты при работе усилителя с обратной связью и без неё а также влияние способа измерения. Выработаны рекомендации по оптимизации схемотехнических решений усилителей мощности УКВ радиостанций.

**Ключевые слова.** интермодуляция, взаимное влияние передатчиков, частотная зависимость, развязка антенн.

Как правило, основное внимание при изучении параметров радиостанций обращается на частотный диапазон, чувствительность в режиме приёма, мощность в режиме передачи и функциональные возможности. При этом радиостанции с одинаковыми (сопоставимыми) параметрами могут показать различную дальность связи при использовании на объекте. Причиной отличий являются параметры внутриобъектовой электромагнитной совместимости радиосредств.

При работе радиостанций в условиях сосредоточения средств связи на объекте нельзя недооценивать параметры электромагнитной совместимости, которые влияют на основные тактические данные – дальность связи. В реальных условиях при работе радиосредства на антенну в режиме передачи, на выходные цепи радиостанции от антенного входа попадают радиосигналы других источников радиоизлучений. При этом, вследствие нелинейных характеристик усилительных элементов (основной источник нелинейности), неизбежно возникают вторичные колебания интермодуляционного типа (пример изображен на рисунке 1). В результате взаимодействия сигналов  $P_0$  и  $P_1$  (полезного и мешающего соответственно) возникает множество новых составляющих, с частотами полезного и мешающего сигналов, отстоящих друг от друга на частоту  $\Delta f$ . [1] И, как итог, в излучаемом антенной спектре, присутствуют новые радиочастотные составляющие – побочные колебания интермодуляционного типа. Данные колебания способны существенно снизить дальность связи других радиостанций, работающих в режиме приёма и находящихся поблизости к передающим радиосредствам на частотах этих колебаний, а также на частотах близких к ним. Наиболее проблемными являются источники излучения, находящиеся в непосредственной близости – такие, как радиостанции того же диапазона, расположенные на одном объекте с упомянутым радиосредством.

Описанная ситуация типична для стационарных и особенно для подвижных объектов обеспечения связи, характеризующихся большим количеством связанного оборудования, расположенного на малой площади самого объекта. Ориентировочные размеры подвижных объектов в подавляющем большинстве случаев не превышают 5х2.5 м. Небольшие размеры объектов заставляют радиостанции узла связи работать на близко расположенные антенны или на одну антенну - с помощью развязывающих устройств - антенных фильтров.

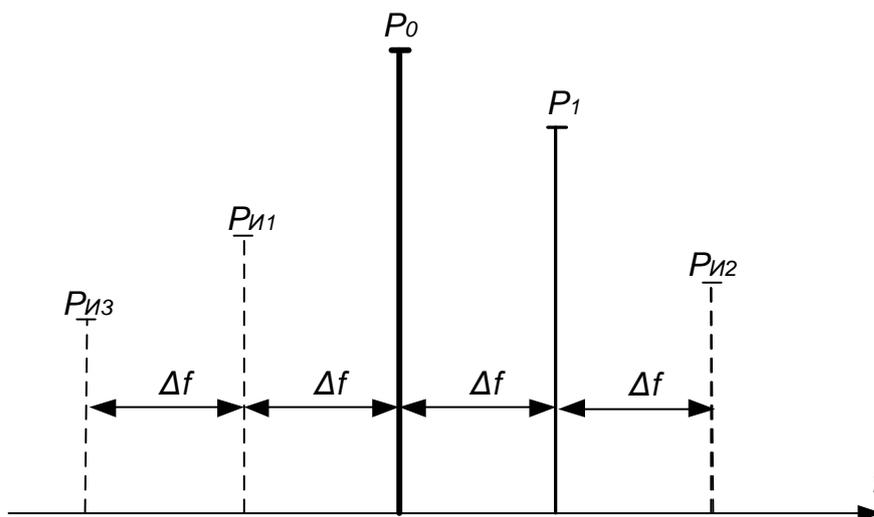


Рисунок 1 - Пример возникающих интермодуляционных искажений ( $P_{И}$ ) при совместной работе радиопередатчиков ( $P_0$  и  $P_1$ ).

Из графика, изображенного на рисунке 2, видно, что значения межантенной развязки при расстоянии между антеннами 1,5 м невелики и достигают минус 15 дБ в нижней части УКВ диапазона [2].

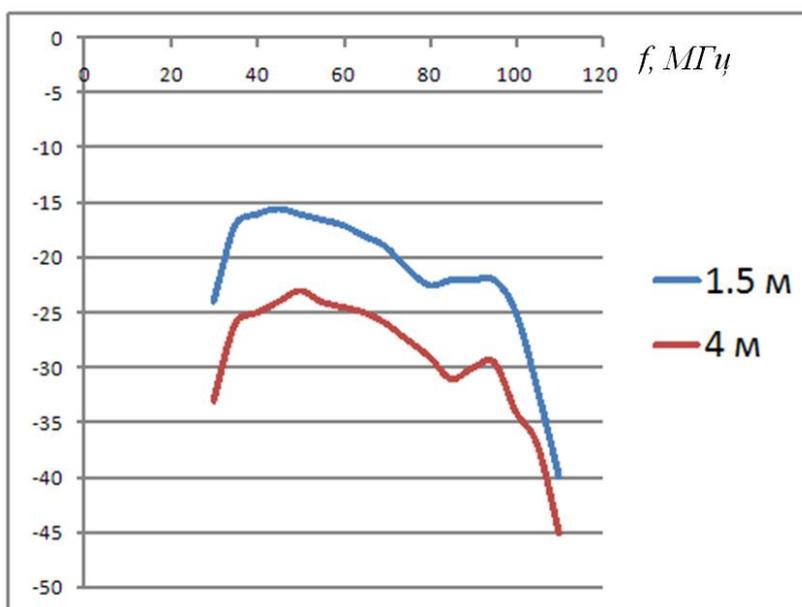


Рисунок 2. Практические данные развязки в диапазоне 30-108 МГц между полноразмерными антеннами при расстоянии между ними 1.5 и 4 м.

Интермодуляционные составляющие, образованные при работе двух расположенных поблизости передатчиков, попадают на входы других радиосредств, находящихся в режиме приема. Данные составляющие могут попадать в полосу пропускания преселектора (1-2 % от частоты настройки). Уровень интермодуляционных искажений, возникающих и попадающих на вход в данном случае, может определять необходимую избирательность приемника по блокированию, и избирательность по побочным каналам приёма в полосе пропускания преселектора радиосредства [4].

Выходной тракт современных программно определяемых радиостанций, вследствие широкого диапазона рабочих частот (от нескольких октав), имеет в своем составе блок переключаемых фильтров низкой частоты (фильтров гармоник). На каждом из фильтров радиостанция работает в диапазоне частот с перекрытием П равным 1,4 – 1,7. Данные фильтры, помимо подавления высших гармонических составляющих, генерируемых в усилителях мощности, препятствуют попаданию к усилителю сигналов соседних радиосредств, работающих на частотах значительно выше его рабочей частоты (в П и более раз). Также в случае генерации интермодуляционного продукта частотой значительно выше рабочей частоты (при частоте мешающей радиостанции значительно ниже полезной) – фильтр блокирует его прохождение в антенну. Таким образом структура выходного

тракта достаточно эффективно борется с появлением в антенне интермодуляционных искажений при отстройке соседнего (мешающего) радиосредства на октаву и далее. Но плотность расположения радиосредств на объекте не позволяет выделить настолько широкие диапазоны работы всем радиостанциям. В широкодиапазонных возимых радиостанциях старого парка для обеспечения возможности работы на небольших частотных отстройках в структурную схему передатчика входил узкополосный механически перестраиваемый полосовой фильтр на выходе усилителя мощности. В современных программно определяемых радиостанциях, имеющих возможность работы в режиме ППРЧ, механическая перестройка по частоте неприемлема вследствие её низкой скорости, поэтому применяется лишь набор переключаемых фильтров низкой частоты.

Таким образом в современных широкодиапазонных программно определяемых радиостанциях особенно важна задача оптимизации выходной части тракта передачи с точки зрения минимизации интермодуляционных искажений с другими передатчиками. Так как выходной усилитель в режиме передачи является основным источником нелинейных эффектов [1], задача его схмотехнической оптимизации и оптимизации режима работы выглядит наиболее приоритетной при работе над минимизацией уровня генерируемых интермодуляционных составляющих. Необходимо проработать вопрос как минимизации искажений, так и способа оценки результатов минимизации.

Классический способ оценки интермодуляционных искажений заключается в подаче на вход усилителя двух гармонических составляющих одинакового уровня с частотами  $F_1$  и  $F_2$  и последующей оценке уровня возникших интермодуляционных составляющих (как правило третьего порядка:  $2F_1-F_2$  и  $2F_2-F_1$ ) [3]. Основной причиной нелинейных искажений принято считать отклонения от линейности амплитудной характеристики усилителя, особенно при работе вблизи точки компрессии (рисунок 3).

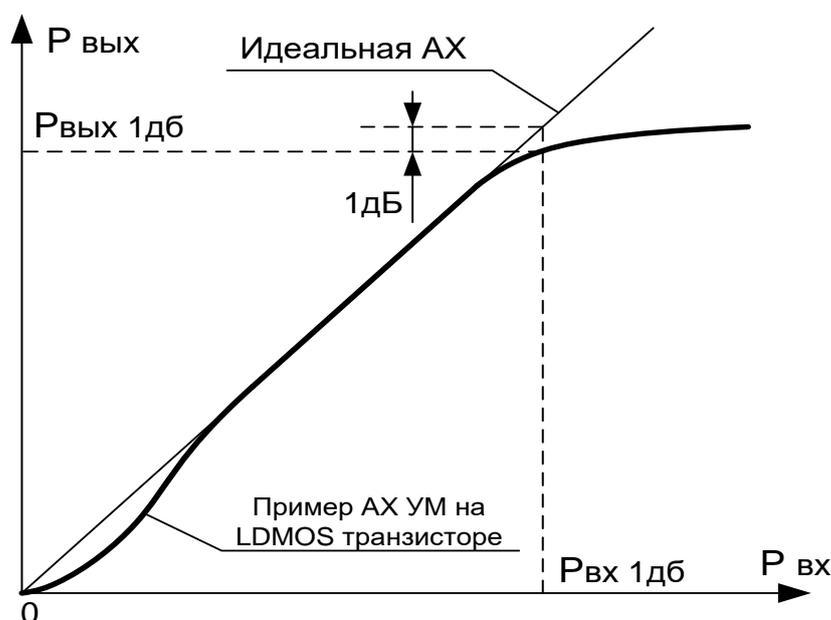


Рисунок 3. Пример амплитудной характеристики усилителя

В абсолютном большинстве случаев целью количественной оценки интермодуляционных искажений усилителя служит обеспечение необходимого качества передаваемых сигналов, имеющих амплитудную огибающую – все виды амплитудной модуляции. Поэтому, при подобных измерениях разнос частот  $F_1$  и  $F_2$  лежит в пределах рабочей полосы модулированного сигнала и составляет, как правило, 1 кГц. Но, как показали экспериментальные исследования, при увеличении разноса частот между передатчиками, уровень генерируемых интермодуляционных составляющих способен в значительной степени изменяться в сторону ухудшения. В экспериментальных исследованиях использовались два варианта оценки уровня возникающих интермодуляционных продуктов – двухтоновый и способ подачи помехи через выход усилителя.

Структурная схема измерительной установки изображена на рисунке 4. На вход испытуемого усилителя УМ подаются сигналы от двух высокочастотных генераторов Г1, Г2 через согласованный тройник Т. Усиленный сигнал поступает на согласованную нагрузку в виде последовательного включения двух аттенуаторов АТТ с суммарным коэффициентом передачи минус 50 дБ. Далее сигнал поступает на анализатор спектра S, с экрана которого снимаются показания уровней составляющих выходного спектра.

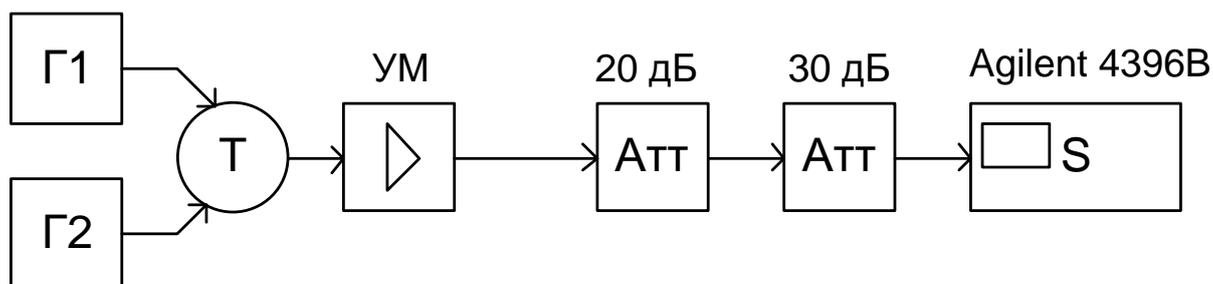


Рисунок 4. Структурная схема измерительного стенда для оценки интермодуляции двухтоновым методом.

Испытуемый усилитель – одноконтурный на базе LDMOS транзистора BLF571, с параллельной по напряжению отрицательной обратной связью (рисунок 5). Высокочастотные усилители на биполярных транзисторах имеют худшие характеристики по интермодуляции с поступающими на выход помехами, чем усилители на полевых LDMOS транзисторах [1].

Как правило, высокочастотные каскады усиления строятся по схеме с обратной связью (далее ОС). Испытуемый усилитель также содержит цепь ОС (коэффициент передачи цепи ОС – около 0.05). Отрицательная обратная связь повышает линейность частотной и амплитудной характеристики усилительного каскада, тем самым снижает уровень интермодуляционных искажений усилителя. Но, как показали эксперименты, данное улучшение справедливо для искажений, являющихся результатом перемножения составляющих с небольшой взаимной частотной расстройкой. При большой частотной отстройке входных составляющих спектра обратная связь напротив - приводит к увеличению уровня интермодуляционных искажений усилителя. Спектрограммы для указанного случая приведены на рисунке 6.

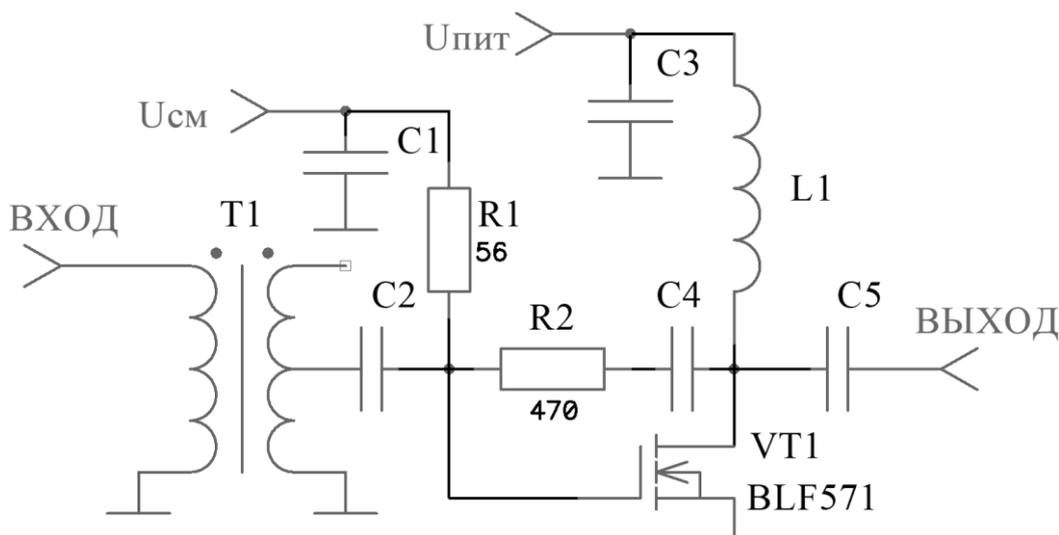


Рисунок 5. Принципиальная схема испытуемого усилителя мощности

На правой спектрограмме видно, что без ОС (разорвана цепь R2, C4) зависимость амплитуды интермодуляционных продуктов от частоты взаимной расстройки генераторов практически отсутствует, а сам интермодуляционный продукт третьего порядка на 35 дБ ниже уровня полезного сигнала. При этом на левой спектрограмме (усилитель с ОС) видна существенная зависимость уровня интермодуляционного продукта при изменении частоты мешающего генератора. К примеру, если при отстройке в 20 кГц уровень продукта перемножения на 45 дБ ниже полезного сигнала, то при взаимной отстройке генераторов в 300 кГц этот уровень принимает значение лишь на 28 дБ ниже. Экспериментальные исследования показывают подобную зависимость как у одноконтурных, так и у двухконтурных усилителей.

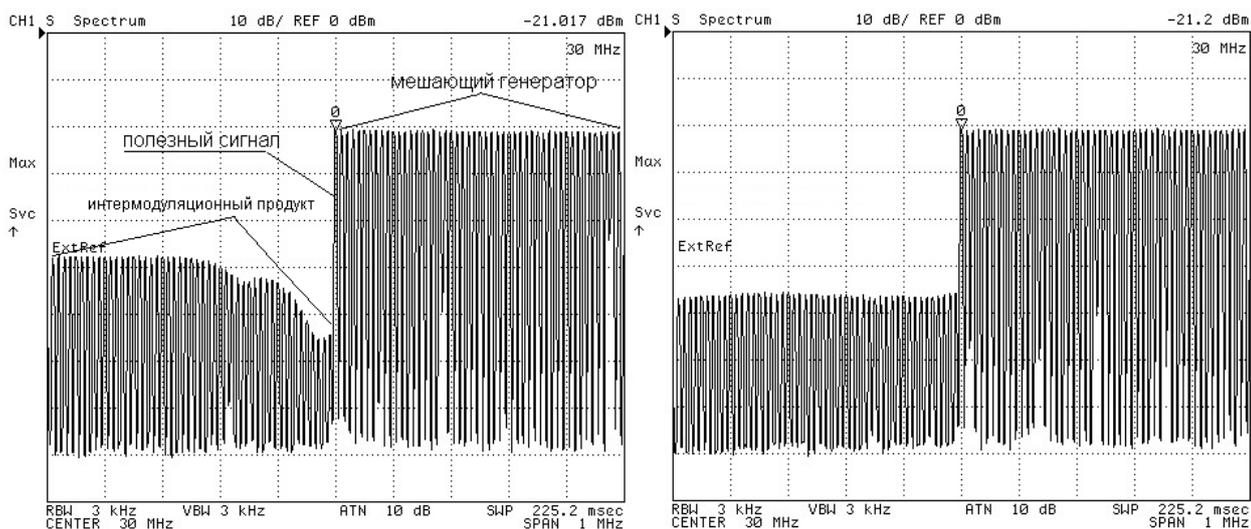


Рисунок 6. Спектр сигнала на выходе усилителя в режиме сохранения максимальных значений при изменении расстройки генераторов с полосой обзора 1 МГц с обратной связью (слева) и без обратной связи (справа).

На рисунке 7 схематически показан характер влияния номиналов блокировочного дросселя L1 цепи питания и разделительного конденсатора обратной связи C4 на амплитудно-частотную зависимость продукта интермодуляции третьего порядка. Частотное положение зоны подъёма огибающей продуктов интермодуляции третьего порядка смещается при изменении номиналов указанных элементов. При помощи оптимизации номиналов блокировочных элементов можно снизить интегральный уровень возникающих в усилителе интермодуляционных искажений. Происходящий процесс будет прокомментирован ниже.

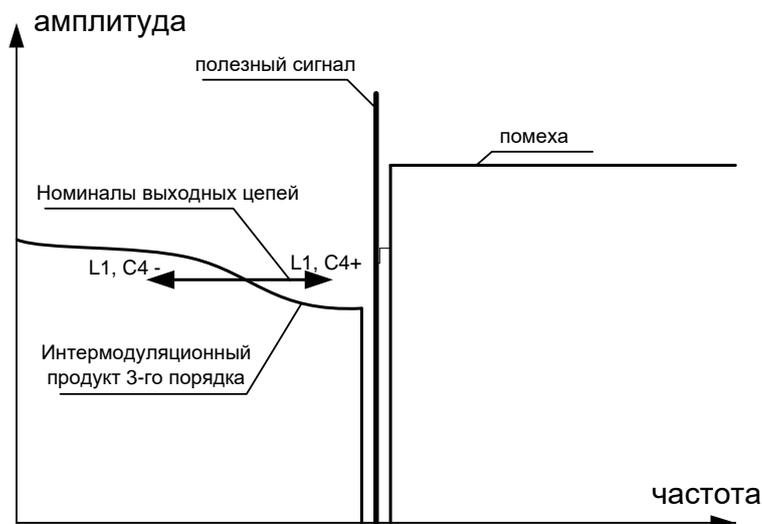


Рисунок 7. Схематичный пример спектрограммы измерения интермодуляционных искажений в широком диапазоне частот

Проведены экспериментальные исследования с тем же усилителем при подаче мешающего воздействия через выходные цепи. Структурная схема измерительной установки, изображенная на рисунке 8. На вход испытуемого усилителя УМ подаётся сигнал от высокочастотного генератора Г1. Усиленный сигнал через проходной ответвитель поступает на согласованную нагрузку в виде аттенюатора АТТ коэффициентом передачи минус 20 дБ (имитация развязки между антеннами 20 дБ). С обратной стороны аттенюатора подаётся «мешающий» сигнал сопоставимой мощности с перестройкой по частоте. В качестве генератора Г2 использовалась УКВ радиостанция. Со стороны ответвителя сигнал поступает на анализатор спектра S, с экрана которого снимаются показания уровней составляющих выходного спектра. Мощность продуктов интермодуляции не зависит от выходной мощности исследуемого усилителя до момента, когда мощности полезного и мешающего сигналов в точке измерения не становятся сравнимыми. При этом, изменяя мощность мешающего сигнала, мощность интермодуляционных продуктов изменяется строго пропорционально [5].

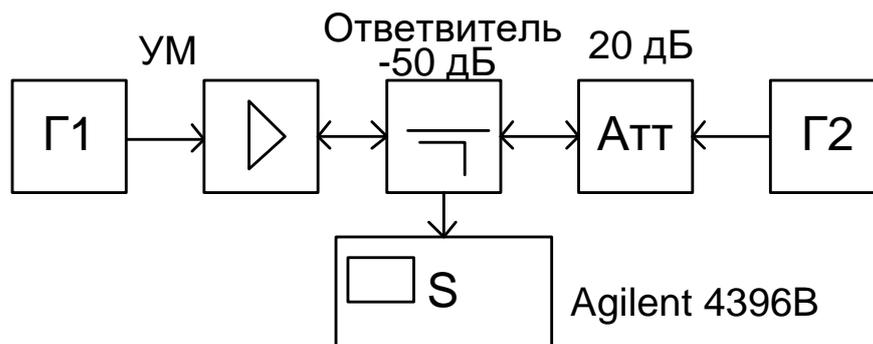


Рисунок 8.. Структурная схема измерительного стенда для оценки интермодуляции методом воздействия помехи через выход

Спектрограммы на рисунке 9 показывают идентичность характера частотной зависимости интермодуляционного продукта с измерениями, проведенными двухтоновым методом (рисунок 6). Зона изменения уровня искажений занимает ту же частотную позицию. Относительный уровень продукта интермодуляции 3-го порядка при двух способах измерения различается, но амплитудно-частотные тенденции сохраняются.

Оценка искажений методом воздействия помехи через выход требует применения мешающей радиостанции, либо усилителя для генерации сигнала необходимой мощности. Это заметно усложняет стенд. С учетом высокой степени корреляции результатов измерений двумя способами, допустимо использование двухтонового способа измерения (рисунок 4) для контроля результатов при оптимизации параметров усилительного тракта в части минимизации интермодуляционных искажений с последующей проверкой полученных результатов методом воздействия помехи через выходные цепи.

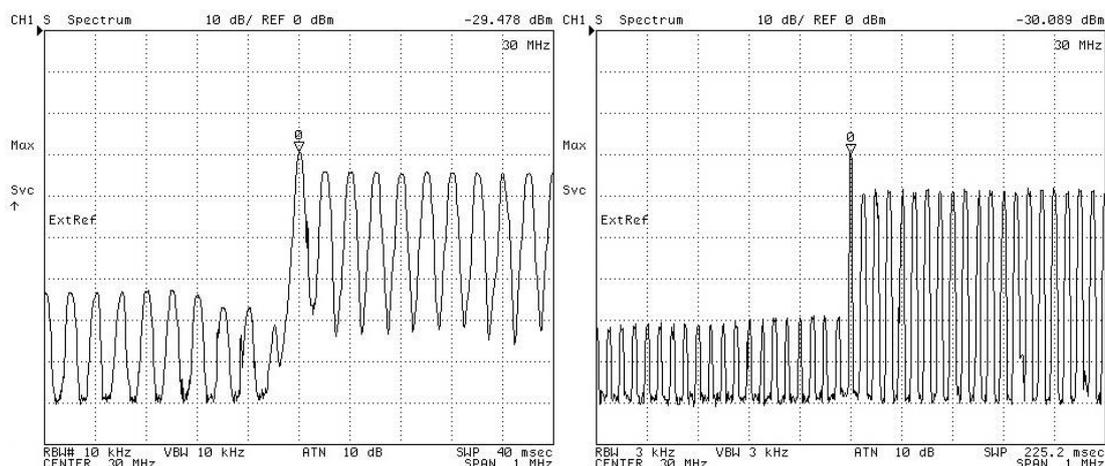


Рисунок 9. Спектрограмма выходной интермодуляции усилителя в режиме сохранения максимальных значений при перестройке генератора Г2 с полосой обзора 1 МГц с ОС (слева) и без ОС (справа).

Зависимость амплитуды интермодуляционных продуктов от частоты расстройки сигналов в схеме с ОС объясняется следующим образом:

- формируются интермодуляционные продукты на нелинейном элементе (транзисторе) - рассмотрим продукты 2-го и 3-го порядка;
- низкочастотный продукт 2-го порядка (в нашем случае  $f_2 - f_1$ ) разностной частоты попадает во входные цепи усилителя (затвор) через цепи ОС и производит амплитудную модуляцию полезного ВЧ сигнала, смещая рабочую точку транзистора с разностной частотой;
- от амплитуды данного продукта 2-го порядка, поступающего на затвор, и зависит итоговый уровень искажений 3-го порядка, так как формируемая таким образом.

Как указано ранее, при подаче мешающего сигнала как на вход усилителя, так и на выход, уровень интермодуляционных искажений с увеличением разницы генераторов по частоте увеличивается. Частотная область, в которой происходит подъем уровня, меняется при изменении частоты среза фильтров высокой частоты, образованных цепью питания и цепью обратной связи каскада усиления. Последний тезис косвенно подтверждается выраженной неравномерностью амплитуды интермодуляционных продуктов при проверке усилителя, в составе стенда проверки которого есть ФНЧ 7-го порядка на выходе – рисунок 10. Следовательно - для оптимизации параметров интермодуляции усилителя с ОС необходимо: минимизировать уровень продукта интермодуляции 2-го порядка, снизить его влияние на входные цепи усилительного элемента через

цепь обратной связи. Данного эффекта, к примеру, можно достигнуть, снизив коэффициент передачи цепи ОС на частотах ниже рабочего диапазона, а также дополняя схему блокировочными цепями для снижения уровня низкочастотного продукта 2-го порядка. Следует также выбирать как можно более узкие диапазоны выходных фильтров гармоник, отдавая предпочтение насколько возможно более узкополосным решениям.

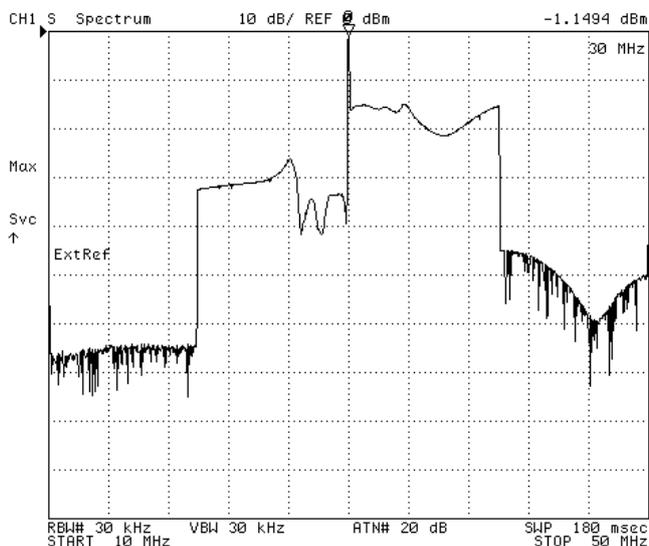


Рисунок 10. Спектр сигнала на выходе двухтактного усилителя на транзисторах BLF574 с ФНЧ на выходе в режиме сохранения максимальных значений при перестройке генератора помехи в диапазоне 30-40 МГц. Выходная мощность исследуемого усилителя – 25 Вт, мощность мешающего сигнала – 40 Вт.

С учетом высокой степени корреляции результатов измерений двумя способами - допустимо использование двухтонового способа измерения при оптимизации параметров усилителей в части минимизации интермодуляционных искажений, возникающих при воздействии мешающих сигналов через антенну. Данный способ эффективнее в применении по причине упрощенной схемы.

**Список использованных источников:**

1. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Е.М. Виноградов Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2009. – С. 146-148.
2. Study of the isolation between VHF land mobile radio antennas in close proximity/ Report ITU-R M.2141 2009. . – P. 11-13.
3. Методика измерения IP2 и IP3 двухтонового сигнала / А.Е. Поляков, Л.В. Стрыгин; Труды МФТИ том 4 №2 2012.– С.54-56.
4. Сухопутная подвижная служба. Устройства радиосвязи, работающие в полдосе частотот 30 до 1000 МГц. Требования и методы измерений: СТБ 1200-99 \_ введ. 01.07.2000. Минск 2000.
5. Проблематика обеспечения параметров по взаимной интермодуляции нескольких программно определяемых радиосредств с позиции обеспечения их ЭМС./ А.А.Водчиц; 8-я международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения Сборник научных статей Часть 4 Минск 2019 С. 42-44.

UDC 621.396.2

## ON SOME EFFECTS OF INTERMODULATION IN OUTPUT AMPLIFIERS OF WIDE-BAND VHF RADIO STATIONS

Vodchyts A.A.<sup>1</sup>

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus \*

*Koslov S.V.. – Doctor of Technical Sciences*

**Annotation.** The paper provides practical information about intermodulation distortions arising between simultaneously operating in the transmission mode of radios. Using an experimentally investigated radio-frequency amplifier as an example, the dependences of the level of intermodulation distortion on frequency are shown when the amplifier is operating with and without feedback, as well as the influence of the measurement method. Recommendations for optimization of circuitry solutions for power amplifiers of VHF radio stations have been developed.

**Keywords.** intermodulation, mutual influence of transmitters, frequency dependence, antenna decoupling.