

ОЦЕНКА ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ КАСКАДИРУЕМЫХ БЛОКОВ

В. Артёменко, UT5UDJ,

01021, г. Киев-21, а/я 16

E-mail: box302@post001.kiev.ua

В настоящее время качественная работа в эфире возможна только с использованием сверхдинамичной аппаратуры. Если при конструировании такой аппаратуры ещё можно оценить конкретные параметры каждого блока, то оценка интермодуляционных и динамических свойств соединения отдельных блоков, не говоря уже о конструкции в целом, представляет собой значительные трудности. Поэтому данный вопрос в литературе практически не рассматривался.

Обычно конструкторы ограничиваются замечаниями о том, что чем больше динамика отдельных блоков, тем больше будет и динамика всего устройства в целом. Однако без конкретных цифровых характеристик говорить о том или ином уровне динамичности некорректно.

Как правило, для описания динамических характеристик устройства оперируют значением точки перехвата третьего порядка. Динамический диапазон характеризуют значением точки перехвата третьего порядка и шумовыми характеристиками.

В данной статье рассмотрены искажения каскадируемых блоков и их анализ в численном виде с использованием понятия точек перехвата третьего порядка. Общие понятия и определения динамических характеристик рассмотрены, например, в [1, 2].

В устройствах с последовательным каскадированием блоков (трансивер, приёмник) очень важно знать уровень продуктов искажений на выходе последнего блока цепочки при подаче двухтонового сигнала (два сигнала с одинаковой амплитудой, но с разной частотой) на вход первого блока.

Рассмотрим сначала один блок устройства. Пусть на вход блока поступает входная мощность P_{in} , выраженная в дБм (мощность одного тона двухтонового сигнала). Сам блок имеет коэффициент усиления по мощности G , дБ, и точку перехвата по входу третьего порядка $IP3_{in}$, дБм. Требуется найти уровень искажений третьего порядка D_{out} , дБм, получающийся на выходе этого блока.

Обычно коэффициент усиления (если нет компрессии) однозначно характеризует любой блок. Как известно,

в самом общем случае

$$IP3_{outN} = IP3_{inN} + G_N, \quad (1)$$

где N – индекс (N -го блока устройства).

Заметим, что само по себе использование понятия "точка перехвата" некорректно. Следует говорить о точке перехвата (определённого порядка) либо по входу, либо по выходу блока или устройства [3].

Для не очень больших уровней сигналов равенство (1) выполняется достаточно хорошо, поэтому в наших расчётах, охватывающих уровни сигналов реального эфира, будем считать такое равенство достаточно строгим.

Точно такое же предложение вводим и для формулы интермодуляционных искажений по выходу любого N -го блока:

$$D_{outN} = 3 \cdot P_{in} - 2 \cdot IP3_{inN} + G_N, \quad (2)$$

где D_{outN} – мощность интермодуляционных искажений третьего порядка на выходе N -го блока (для одного тона двухтонового сигнала, поданного на вход данного блока), дБм; P_{in} – мощность одного тона двухтонового сигнала, подаваемого на вход N -го блока, дБм; $IP3_{inN}$ – точка перехвата третьего порядка по входу N -го блока, дБм; G_N – коэффициент усиления по мощности N -го блока, дБ.

Пусть, например, блок (рис. 1) имеет параметры $G=10$ дБ и $IP3_{in}=5$ дБм. На вход его подаётся двухтоновый сигнал с мощностью одного тона, равной $P_{in} = -30$ дБм. Тогда на выходе блока образуется продукт интермодуляции третьего порядка (от одного данного тона входного испытательного сигнала) с мощностью, равной

$$D_{out} = 3 \cdot (-30) - 2 \cdot (5) + 10 = -90 - 10 + 10 = -90 \text{ (дБм)}.$$

Далее рассмотрим уже два блока с параметрами, указанными на рис. 2.

Как было отмечено выше, уровни сигналов (рассматриваемых с точки зрения реального эфира) будут не очень велики, поэтому и нелинейности блоков будут также невелики (используются достаточно динамичные блоки). В этой связи можно применить квазилинейный подход к решению поставленной задачи.

Пусть на вход первого блока подаётся двухтоновый сигнал с мощностью одного тона, равной $P_{in1} = -10$ дБм (рис. 2).

Тогда

$$D_{out1} = 3 \cdot (-10) - 2 \cdot (5) + 10 = -30 \text{ (дБм)}.$$

Поскольку на вход первого блока подали сигнал -10 дБм, на выходе первого блока мощность будет равна

$$-10 + 10 = 0 \text{ (дБм)},$$

т.е. на вход второго блока будет подаваться мощность (одного тона) испытательного сигнала величиной 0 дБм (первый каскад усилил мощность испытательного сигнала).

На выходе второго блока согласно (2) будем иметь

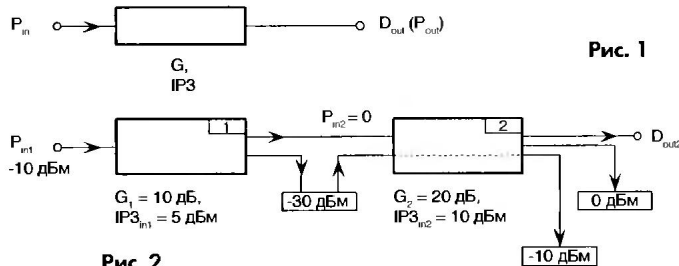
$$D_{out2} = 3 \cdot (0) - 2 \cdot (10) + 20 = 0 \text{ (дБм)}.$$

Вместе с тем искажения, возникшие в первом блоке (на выходе первого блока имеем -30 дБм), поступают также на вход второго блока и уже на выходе второго блока имеем их величину (учитывая, что $G_2 = 20$ дБ), равную

$$-30 + 20 = -10 \text{ (дБм)}.$$

Поскольку, как было указано выше, используется квазилинейный подход к решению задачи, мощности (искажений) 0 дБм и -10 дБм в нагрузке устройства суммируются, что даёт в итоге искажения двухблочного устройства.

Как известно, значения в дБм суммировать нельзя, поэтому переводим величины мощности в ватты, затем сум-



мируем полученные значения и переводим далее эту сумму в ваттах в мощность дБм.

Формула для перевода мощностей, выраженных в дБм, в мощности в ваттах, имеет вид

$$PW = 10^{\frac{P_{\text{дБм}} - 30}{10}} \quad (3)$$

(число 10 возводим в соответствующую степень, т.е. десятично антилогарифмируем).

Принятые здесь и далее обозначения в большей степени использованы как имена переменных в разработанной автором программе (см. ниже).

В данном случае PW – мощность, выраженная в ваттах (W), $P_{\text{дБм}}$ – мощность, выраженная в дБм.

Тогда

$$PW1 = 10^{\frac{0 - 30}{10}} = 0,0010 \text{ (Вт)}$$

соответствует мощности 0 дБм,

$$PW2 = 10^{\frac{-10 - 30}{10}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ (Вт)}$$

соответствует мощности -10 дБм.

Итоговая мощность (суммарная мощность искажений в нагрузке) равна

$$PS = 0,0010 + 1 \cdot 10^{-4} = 0,0011 \text{ (Вт)}$$

Далее переводим суммарную мощность в ваттах в мощность в дБм и получаем окончательный ответ.

Формула для такого перевода имеет вид

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log_{10}(PW) + 30. \quad (4)$$

Тогда

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log_{10}(0,0011) + 30 = 0,4139 \text{ (дБм)}$$

Таким образом, на выходе двухблочного устройства (рис. 2) имеем уровень интермодуляционных продуктов третьего порядка 0,4139 дБм.

Теперь рассмотрим устройство, состоящее из трёх последовательно соединённых блоков (рис. 3). Пусть на вход такого устройства (вход первого блока) подаётся мощность -30 дБм (для одного тона двухтонового сигнала). Рассчитаем уровень интермодуляционных искажений на выходе устройства (точнее в нагрузке, подключённой к выходу третьего блока), используя квазилинейный подход к решению задачи.

Под действием входного сигнала на выходе первого блока образуется интермодуляционная помеха с уровнем

$$D_{\text{out1}}^* = 3 \cdot (-30) - 2 \cdot (5) + 10 = -90 \text{ (дБм)}$$

Далее эта интермодуляционная по-

меха усиливается вторым и третьим блоком.

На выходе устройства первый блок порождает искажения с уровнем (учитывая, что $G_2 = 15$ дБ, $G_3 = 20$ дБ)

$$D_{\text{out1}} = -90 + 15 + 20 = -55 \text{ (дБм)}$$

Одновременно на вход второго блока поступает усиленный первым блоком сигнал с уровнем ($G_1 = 10$ дБ)

$$-30 + 10 = -20 \text{ (дБм)}$$

Таким образом, для второго блока

$$D_{\text{out2}}^* = 3 \cdot (-20) - 2 \cdot (10) + 15 = -65 \text{ (дБм)}$$

На вход третьего блока поступает сигнал (усиленный первым и вторым блоками) с уровнем

$$-30 + 10 + 15 = -5 \text{ (дБм)}$$

Вместе с тем величина D_{out2}^* также усиливается третьим блоком, и на выходе устройства второй блок порождает искажения с уровнем

$$D_{\text{out2}} = -65 + 20 = -45 \text{ (дБм)}$$

Для третьего блока (т.е. выхода устройства) окончательно имеем

$$D_{\text{out3}}^* = D_{\text{out2}} = 3 \cdot (-5) - 2 \cdot (15) + 20 = -25 \text{ (дБм)}$$

Как отмечалось выше, на выходе устройства величины мощности искажений $D_{\text{out1}} = -55$ дБм, $D_{\text{out2}} = -45$ дБм и $D_{\text{out3}} = -25$ дБм должны быть переведены в ватты, суммированы, а сумма вновь переведена в дБм.

Воспользовавшись формулой (3), получаем, что $D_{\text{out1}} = 3,1623 \cdot 10^{-9}$ Вт, $D_{\text{out2}} = 3,1623 \cdot 10^{-8}$ Вт и $D_{\text{out3}} = 3,1623 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Суммарная мощность искажений на выходе устройства (в нагрузке) будет равна (в ваттах)

$$PS = 3,1623 \cdot 10^{-9} + 3,1623 \cdot 10^{-8} + 3,1623 \cdot 10^{-6} = 3,1971 \cdot 10^{-6} \text{ (Вт)}$$

Воспользовавшись формулой (4) и выполнив перевод значения в ваттах в значение в дБм, получим окончательный ответ

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log_{10}(PS) = -24,9520 \text{ (дБм)}$$

Автором был рассчитан также пример оценки интермодуляционных свойств устройства, состоящего из четырёх блоков с характеристиками соответственно: $G_1 = 0$ дБ и $IP3_{\text{in1}} = 10$ дБм, $G_2 = 2$ дБ и $IP3_{\text{in2}} = 15$ дБм, $G_3 = 4$ дБ и $IP3_{\text{in3}} = 20$ дБм, $G_4 = 6$ дБ и $IP3_{\text{in4}} = 25$ дБм.

При подаче на вход устройства сигнала с уровнем -10 дБм на его выходе появляется продукт интермодуляционных искажений с уровнем -37,4273 дБм (точнее, появляется в нагрузке этого каскада). Как показал опыт проведения подобных расчётов, по мере роста чис-

ла последовательно включённых блоков объём вычислений стремительно возрастает. Поскольку в трансивере (приёмнике) до кварцевого фильтра (считая от антенного входа) может быть до 10 блоков, без специальной программы выполнить подобные расчёты крайне сложно. В этой связи автором была разработана и апробирована программа оценки интермодуляционных свойств каскадируемых блоков. С помощью расчётов по разработанной автором программе удастся правильно расположить каскады для достижения наилучших динамических показателей устройства, т.е. минимизировать имеющиеся искажения.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть входной высоколинейный ВЧ-тракт (Front-End) трансивера начинается полосовым фильтром, а заканчивается кварцевым фильтром (рис. 4). Подобное классическое построение упоминалось в книгах Э. Т. Рэда [1, 2]. Такое построение считается наилучшим вариантом (даёт наилучшие параметры устройства). Но так ли это с точки зрения интермодуляционных искажений?

Принимаем, что сигнал идёт от антенны к кварцевому фильтру, т.е. реализуется режим приёма (блок 1 подключён к антенному входу). При анализе данных расчётов по программе предполагается, что все блоки предварительно согласованы по мощности и импедансам. Это, например, означает, что в случае использования 50-омной схемотехники генератор сигнала (или антенна) также имеет сопротивление по ВЧ, равное 50 Ом. Это же сопротивление имеют и все порты рассматриваемых блоков, а также индикатор нелинейных искажений, подключаемый к выходу кварцевого фильтра (спектроанализатор, другой контрольный приёмник и пр.).

Рассматривая общую усилительную структуру каждого блока (усиливает ли данный блок сигнал или нет), анализируется не только знак значения в децибелах мощности (дБм), но и конкретное численное значение. В структуре устройства знак “-” (минус) характеризует пассивный блок, а знак “+” (плюс) – блок активный. Уровни интермодуляционных продуктов третьего порядка приведены по выходу каждого блока (с учётом имеющихся искажений и их усиления от впереди стоящих блоков). Окончательный

итог указан на выходе – это уровень искажения третьего порядка, присутствующий на согласованной нагрузке, подключённой к выходу кварцевого фильтра (-122 дБм). С целью возможности адекватного сравнения различных модификаций структур, образующихся при перестановке бло-

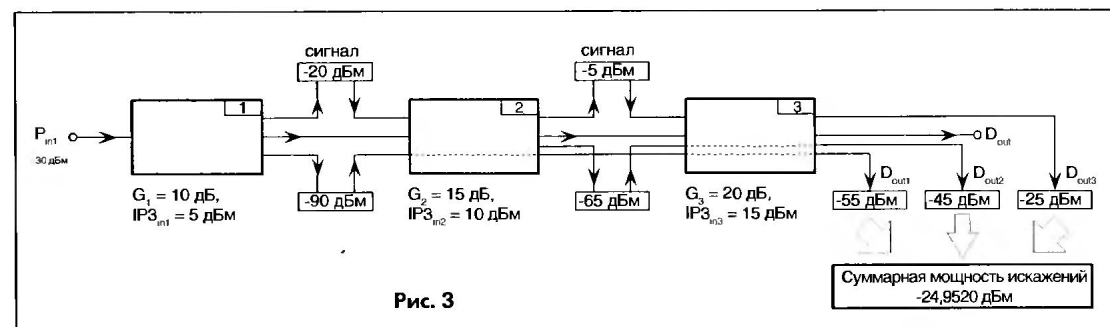


Рис. 3

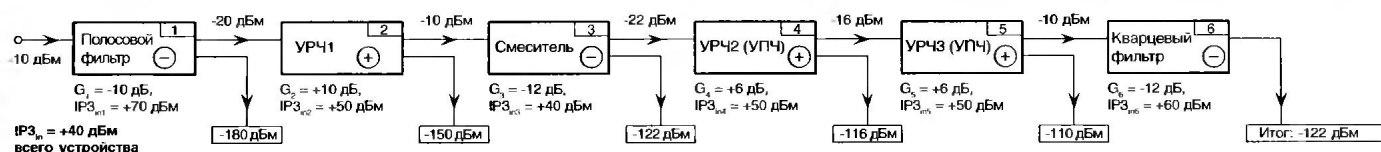


Рис. 4

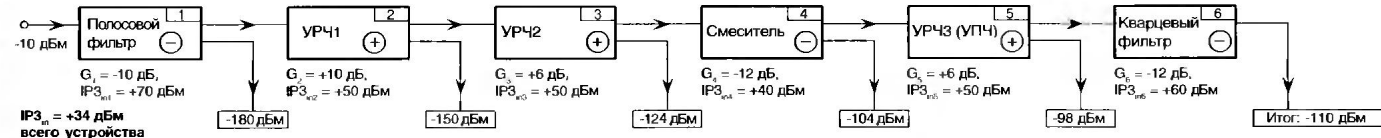


Рис. 5

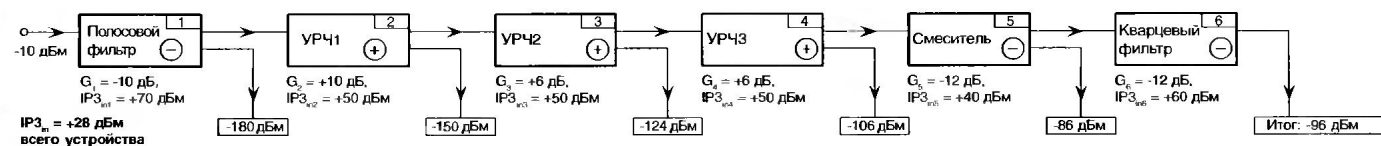


Рис. 6

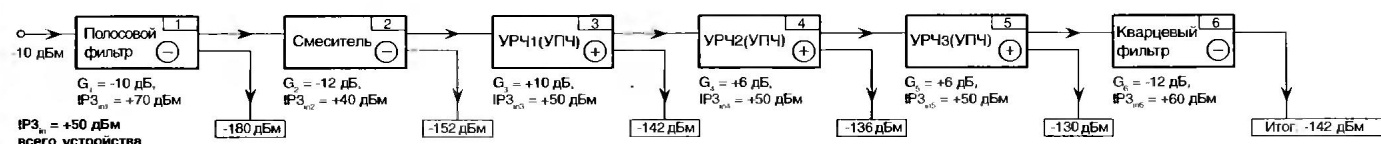


Рис. 7

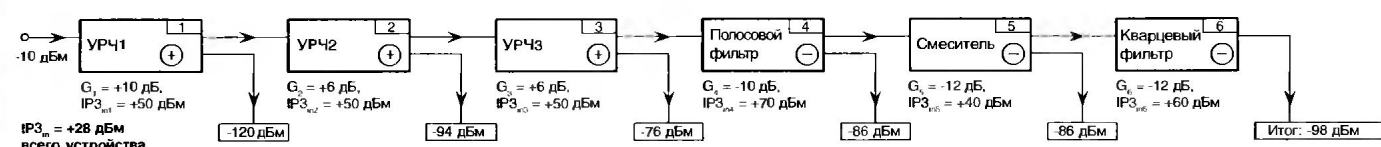


Рис. 8

ков, всегда на вход устройства подаётся мощность одной величины (в данном случае -10 дБм).

На рис. 5...8 приведены другие возможные структуры входного высоколинейного ВЧ-тракта.

Поскольку

$$D_{out} = P_{IMDout} = 3 \cdot P_{in} - 2 \cdot IP3_{in} + G,$$

то с учётом очевидного соотношения

$$P_{IMDin} = P_{IMDout} - G,$$

Приходим к расчётной формуле вида

$$P_{IMDin} = \frac{1}{2} (3P_{in} - P_{IMDout} + G),$$

где $G = G_1 + G_2 + \dots + G_N$ – суммарный коэффициент усиления по мощности устройства в целом (в дБ), равный сумме усиления отдельных его блоков (в дБ). Расчётные значения точек перехвата третьего порядка по входу также приведены на рис. 4...8.

Анализируя данные расчётов для рассматриваемых структур, можно видеть, что наилучшими динамическими свойствами (не путать с динамическим диапазоном, учитывающим также и шумовые свойства!) обладает структура, представленная на рис. 7, а наихудшими – струк-

туры, представленные на рис. 6 и 8.

Классически построенная структура (рис. 4) также достаточно динамична, но уступает по рассматриваемым показателям структуре, приведенной на рис. 7. При этом, как видно, структура, приведенная на рис. 7, явно противоположна классической (рис. 4).

Понятно, что поскольку рассматриваются лишь демонстрационные примеры, наилучшая по интермодуляционным показателям структура может и не обладать другими очень высокими характеристиками, например, шумовыми (т.е. её динамический диапазон не будет, по-видимому, наибольшим среди всех других анализируемых в данном случае структур). Но, тем не менее, на этот факт (наилучшие динамические свойства структуры на рис. 7) следует обратить особое внимание. Реальная польза от расчётов по разработанной автором программе состоит в том, что конструктор быстро получает конкретные числовые значения интермодуляционных свойств реальных устройств.

Поскольку динамические свойства всего устройства определяются не толь-

ко свойствами каждого отдельного блока, но и его взаимодействием с другими блоками (т.е. порядком следования блоков), появляется возможность не только анализа, но и синтеза различных устройств с высокими динамическими параметрами.

Программа написана на М-языке, рассчитанном как на MATLAB 5.3 [4], так и на более высокие его реализации. Также предусмотрена реализация в виде EXE-файла, что позволяет пользоваться программой на тех компьютерах, где MATLAB не установлен.

Литература

1. Рэд Э. Схемотехника приёмников. – М.: Мир, 1989.
2. Рэд Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. – М.: Мир, 1990.
3. Артёменко В. Особенности оценки компрессии//Радиолобитель. КВ и УКВ. – 2003. – №11. – С. 29-30.
4. Дьяконов В. П., Абраменкова Н. В., Круглов В. В. MATLAB 5.3/1 с пакетами расширений. – М.: Нолидж, 2001.