

## ПРОБЛЕМЫ НАСТРОЙКИ НЕЛИНЕЙНОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЬНОГО ТРАКТА В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ПРИ СЕРИЙНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

© В. Л. Аронов, Г. С. Колчин, И. В. Коренков, И. П. Яковлев

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

*В статье предложен критерий «ответный сдвиг» для эффективной настройки усилителя с целью снижения вероятности возникновения аномальных эффектов. Методика настройки заключается в контроле режима работы настраиваемого усилителя с помощью специфического двухступенчатого радиоимпульса возбуждения. Целью такого контроля является предупреждение захода режима работы настраиваемого усилителя в перенапряжённый режим.*

**Ключевые слова:** широкополосный усилитель большой мощности, транзистор, сложение мощности, режим работы транзистора, перенапряжённый режим, методика настройки, ответный сдвиг

**Сведения об авторах:** Аронов Вадим Львович, д.т.н., профессор, pulsar@dol.ru; Колчин Геннадий Степанович; Коренков Иван Викторович; Яковлев Иван Павлович, аспирант

## PROBLEMS OF NONLINEAR MICROWAVE AMPLIFIER PATH ADJUSTMENT IN THE FREQUENCY BAND DURING SERIAL PRODUCTION OF TRANSMITTING MODULES

V. L. Aronov, G. S. Kolchin, I. V. Korenkov, I. P. Yakovlev

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

*The article proposes the «response shift» criterion for effective amplifier adjustment in order to reduce the probability of abnormal effects occurrence. Adjustment method involves the control of amplifier operation mode with specific two-staged excitation pulse. The purpose of this control is to prevent the overstressed operation mode of adjustable amplifier.*

**Keywords:** high-power broadband amplifier, transistor, power summation, transistor operation mode, overstressed mode, adjustment method, response shift

**Data of authors:** Aronov Vadim Lvovich, Sc.D., Prof., pulsar@dol.ru; Kolchin Gennadiy Stepanovich; Korenkov Ivan Victorovich; Yakovlev Ivan Pavlovich, postgraduate

Создание мощных СВЧ широкополосных транзисторных усилителей имеет целый ряд принципиальных аспектов. Главные среди них – выбор транзистора, способного в условиях сложения мощности нескольких каскадов обеспечить требуемые выходные параметры усилителя; синтез согласующих цепей каждого усилительного каскада и создание конструкции, отвеча-

ющей требованиям технологичности, габаритным требованиям и требованиям отвода тепла. Проблемы настройки усилительного тракта отчасти оказываются взаимосвязанными с названными проблемами, отчасти являются проблемами специфическими.

Для ограничения области обсуждения из рассмотрения исключены проблемы саморазогрева, что соответствует практике создания

импульсных передающих устройств при относительно малых длительностях радиоимпульсов и при относительно высокой скважности.

В работах по названной теме одним из определяющих моментов является привязка к серийному выпуску модулей, обеспечивающих выходную импульсную мощность в районе 0,4-4 кВт в полосе частот 1-1,5 ГГц [1].

В условиях серийного производства все технологические процессы должны быть строго регламентированы. С этой точки зрения процесс настройки модулей является одним из наиболее критичных, поскольку до сих пор не существует чётко обоснованного алгоритма его реализации.

Суть процесса настройки заключается в том, чтобы реализовать все эксплуатационные параметры, которые на начальном этапе были получены в ходе анализа работы типового усилительного каскада [2] и синтеза его цепей согласования [3], затем они были реализованы экспериментально и статистически подтверждены при изготовлении опытных образцов изделия. В процессе настройки необходимо преодолеть последствия неизбежного разброса параметров как самих транзисторов, так и параметров сборки.

Главная проблема настройки состоит в том, что далеко не все параметры усилительного тракта доступны для моментального контроля. Оператор в ходе настройки проводит объёмный цикл пробных вмешательств в цепи согласования транзисторов, наблюдая за вариацией уровня выходной мощности на одной из контрольных частот, затем, переключив частоту генератора возбуждения, на другой контрольной частоте. Обычно контрольные частоты соответствуют верхней и нижней рабочим частотам. Помимо выходной мощности оператору доступна форма огибающей выходного радиоимпульса на экране осциллографа. Эта информация необходима, в первую очередь, для оперативной реакции на грубые дефекты или выходы из строя отдельных элементов усилительного тракта. На завершающем этапе осциллограмма позволяет зафиксировать или предпринять попытку коррекции длительностей переднего и заднего фронтов, а также неравномерности

вершины огибающей радиоимпульса. Кроме того рабочий стенд должен быть оборудован анализатором спектра для оперативного контроля отсутствия паразитного возбуждения и возможного искажения спектра.

Получаемая информация при осуществлении пробных вмешательств в цепи согласования усилительного тракта носит неоднозначный характер, поэтому оператор должен выбрать путь, ведущий к цели, не слишком затягивая процесс настройки. Следует заметить, что сложность процесса настройки зависит от количества одновременно работающих усилительных каскадов. Настройка одного искусственно изолированного каскада существенно проще. На практике выделение одного каскада с использованием технологических выводов успешно используется, но лишь для каскадов малой и средней мощности. Для линеек мощных транзисторных каскадов реализован метод извлечения собранной в модуле линейки с последующей настройкой на специальном держателе со стандартными разъёмами для присоединения к измерительному стенду. Пример извлечённой линейки показан на рис. 1. Линейка включает три складываемых по схеме типа «бегущей волны» мощных каскада и один аналогичный каскад возбуждения. После настройки линейка отдаёт импульсную выходную мощность порядка 1 кВт на частотах 1 ГГц и 1,5 ГГц при входной мощности 80 Вт. В линейке установлены транзисторы типа УМ1015\_450/10, работающие в классе С при коллекторном напряжении 45 В.

Настройка мощных линеек осуществляется операторами высокой квалифика-

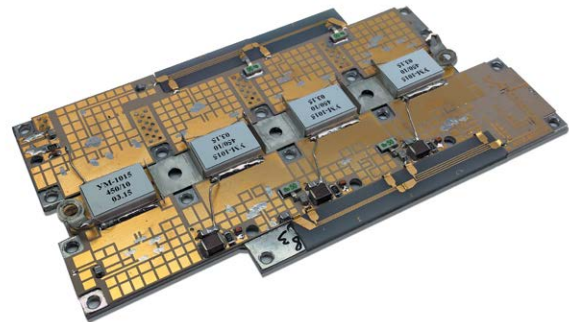


Рис. 1

Внешний вид извлечённой линейки

ции, однако во время испытаний в специальной камере при крайних температурах зачастую обнаруживаются непредвиденные эффекты и уходы параметров. Это возвращает к проблеме поиска более совершенного алгоритма настройки.

Далее рассматривается вариант настройки, основанный на совмещении первичного критерия в виде уровня выходной мощности с неким контролем режима настраиваемого фрагмента усилительного тракта. Понятие «контроль режима» предполагает возможность оценки характера нелинейных процессов, происходящих на каждом периоде усиливаемого сигнала. Для каждого отдельно взятого усилительного каскада возможен «недонапряжённый» режим, когда присутствует «отсечка» коллекторного тока, но по выходу амплитуда коллекторного напряжения меньше напряжения смещения и режим «квазинасыщения» не реализуется. По результатам моделирования пример «недонапряжённого» режима показан на рис. 2а. Другой вариант режима работы усилительного каскада – «перенапряжённый», показанный на рис. 2б. Помимо «отсечки» здесь присутствует эффект «квазинасыщения», который связан с локальным провалом на вершине импульса тока коллектора вследствие низких мгновенных напряжений на коллекторе в этой области.

Характерная особенность используемых мощных транзисторов состоит в том, что максимальная выходная мощность у них соот-

ветствует значительно «перенапряжённому» режиму на низкой рабочей частоте и слабо «перенапряжённому» режиму на верхней рабочей частоте. При этом, как показывают моделирование и экспериментальные данные, абсолютное большинство аномальных эффектов оказываются связаны с «перенапряжённым» режимом того или иного каскада усилительного тракта.

Для ряда эффектов, связанных с «перенапряжённым» режимом, выявлены способы подавления нежелательных вторичных эффектов путём соответствующей коррекции схемы усилительного каскада. Так, например, возникновение низкочастотного паразитного возбуждения [4] и искажения фронтов могут быть эффективно подавлены коррекцией цепи смещения с одновременным введением потерь. Однако ряд эффектов до настоящего времени не удаётся объяснить. К ним относится, в частности, изменение характеристик усилителя в области низких температур, а также некоторые специфические искажения спектра выходного сигнала.

Таким образом, в сложившейся ситуации помимо возможных локальных мероприятий становится актуальным радикальное решение, связанное с подавлением главного фактора – сильно «перенапряжённого» режима для всех каскадов настраиваемого усилителя. Такой подход связан с определённым проигрышем в отношении как выходной мощности, так и КПД усилителя. Величина проигрыша по очень грубым оценкам

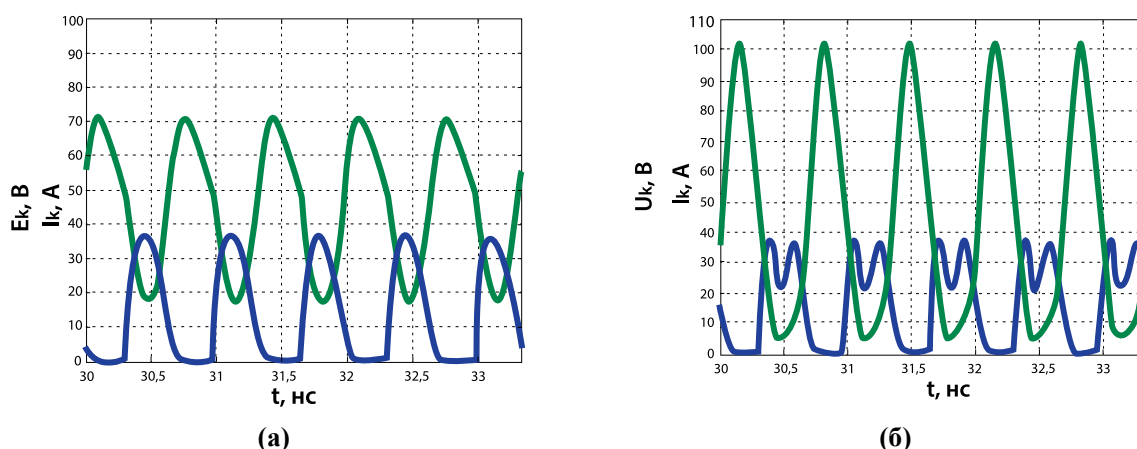


Рис. 2

Эпюры тока коллектора и напряжения в «недонапряжённом» режиме (а) и в «перенапряжённом» режиме (б)

может составлять 10-20 %. На практике такой подход даёт положительный результат, что зафиксировано в ходе нескольких разработок разными разработчиками.

Контроль режима предлагается проводить с использованием контролируемой вариации входной мощности. При настройке изолированного каскада методика является прозрачной и выбор критерия допустимого уровня ответной вариации выходной мощности устанавливается эмпирически по результатам полного комплекса контрольных испытаний тестовых каскадов. Гораздо сложнее дело обстоит при настройке линейки, состоящей из входного и совокупности складываемых выходных каскадов (рис. 1). В этом варианте вторичная вариация выходной мощности оказывается существенно ослабленной, во-первых, из-за наличия предварительного усилительного каскада, во-вторых, из-за схемы сложения. Последний фактор можно устранить, если использовать приём, описанный в работе [5]. Со всех складываемых каскадов кроме одного снимается коллекторное питание. В результате выходная мощность падает в 9 раз, если складывается 3 каскада, однако реакция на тестовое вмешательство в настраиваемую цепь возрастает очень существенно. Таким образом, поочередно могут быть настроены или просто проверены все складываемые каскады. Некоторые проблемы при этом могут быть связаны с неидеальностью мостов сложения мощности в полосе частот.

Несмотря на имеющиеся трудности настройка усилительных линеек с использованием двух критериев оказалась реализуемой, хотя выбор критериев ещё нуждается в дополнительном обосновании.

Важный момент при реализации описанной методики настройки состоит в том, что дополнительная информация о характере режима настраиваемого усилителя должна быть постоянно доступна оператору, например, на экране осциллографа. Предлагается использовать двухступенчатый радиоимпульс возбуждения. Первый интервал времени от начала импульса должен соответствовать номинальной принятой для настройки входной мощности. Второй интервал будет соот-

ветствовать сниженной в заданном отношении (0,5-0,8) входной мощности. Амплитуда и ступенька на огибающей выходного радиоимпульса даёт оператору качественную и, если надо, количественную информацию сразу по двум критериям в ответ на тестовое вмешательство в настраиваемую цепь. Подобный настроечный режим должен при необходимости отключаться, чтобы вернуться к контролю выходной мощности с минимальной метрологической погрешностью.

Аппаратурная задача может быть решена практически без вмешательства в уже эксплуатируемую аппаратуру с помощью автономного блока автоматически переключаемого аттенюатора, установленного на входе настраиваемого усилителя.

Экспериментальная проверка предложенной методики настройки показала её перспективность, однако остаётся вопрос выбора критерия – оптимальной степени подавления на выходе усилителя заданной ступеньки входной мощности. Назовем этот параметр «ответный сдвиг» и обозначим  $K_H$ :

$$K_H = (P_{HO} - P_{CT}) / P_{HO}, \quad (1)$$

где  $P_{CT}$  – выходная мощность «ступеньки», то есть выходная мощность при сниженной в заданном отношении входной мощности,  $P_{HO}$  – выходная мощность при номинальной входной мощности.

Рассмотрим вариант анализа работы усилительной линейки из двух каскадов. Один из них входной каскад соответствует типовому одиночному каскаду на транзисторе типа УМ1015-450/10, а второй каскад формируется из трёх суммируемых типовых каскадов. Номинальная входная мощность для нижней частоты  $f_H = 1$  ГГц будет  $P_{BHO} = 80$  Вт, а для верхней частоты  $f_B = 1,5$  ГГц будет  $P_{BHO} = 100$  Вт. Пониженная ступенька входной мощности принята для  $f_H$   $P_{BX1} = 40$  Вт, а для  $f_B$  принята  $P_{BX1} = 50$  Вт.

Для сближения модельных оценок с реальными условиями каждой цепи согласования на входе и на выходе каж-

дого каскада условно приписаны потери мощности по 10 %. Схеме суммирования приписаны потери мощности 20 %.

В этих условиях при настройке на максимум выходной мощности сделано ещё одно искусственное предположение, что оптимизация нагрузки и входное согласование на всех каскадах оказывается одинаковым. Модельная оценка даёт результаты, сведённые в табл. 1 в столбцах 2 и 3.

В столбцах 4-9 помещены результаты подстройки нагрузки с целью смещения её от оптимальной по критерию максимальной мощности в сторону недонапряжённого режима. Для этого величина активной проводимости нагрузки увеличена в 1,5 раза. Параметры  $P_{н10}$  и  $K_{н10}$  соответствуют такой подстройке только в первом каскаде. Параметры  $P_{но1}$  и  $K_{но1}$  соответствуют такой подстройке в трёх суммируемых каскадах, не трогая входной каскад. Параметры  $P_{н11}$  и  $K_{н11}$  соответствуют такой же подстройке во всех каскадах.

Как видно из сравнения  $P_{но}$  и  $P_{н11}$  проигрыш по мощности в номинальном режиме возбуждения оказался меньше 10 %, а коэффициент ответного сдвига  $K_n$  вырос на низкой частоте в 2,4 раза, а на верхней частоте – в 3,4 раза.

Вариант с коррекцией одного только первого каскада даёт эффект соответственно в 1,6 и 2 раза, а вариант с коррекцией одного только второго суммируемого каскада даёт слабый эффект соответственно 1,2 и 1,4 раза.

Эти результаты подтверждают потенциальную эффективность использования предложенного критерия для достижения более контролируемой настройки усилителя, позволяющей рассчитывать на снижение вероятности аномальных эффектов. При этом надо признать, что ал-

горитм настройки по-прежнему чётко не сформулирован.

На практике оператор стремится не просто получить максимальную выходную мощность на крайних частотах, но пытается по возможности уравнивать оба значения мощности. Это стихийно приводит к той ситуации, когда каскады усилительного тракта на нижней частоте иногда оказываются в существенно «перенапряжённом» режиме. С этой точки зрения оперативный контроль параметра «ответный сдвиг» может оказаться весьма эффективным.

Окончательную оценку эффективности настройки с использованием предложенного критерия «ответный сдвиг» должна дать статистика по материалам настройки достаточного числа выпускаемых модулей.

### *Литература*

1. Евстигнеев А. С., Колодыко Г., Аронов В. Л., Кравцов Л., Поляков С., Шишкань А. Полнофункциональный модуль бортовой АФАР L-диапазона // Фазотрон. – 2011. – Вып. 3-4 (16). – С. 65-69.
2. Аронов В. Л., Евстигнеев А. А. Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учётом квазинасыщения // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2005. – № 1-2. – С. 24-33.
3. Аронов В. Л., Григорян Р. М., Евстигнеев А. А., Коренков И. В. Многоцелевой синтез мощного СВЧ транзисторного каскада // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 1. – С. 3-18.
4. Аронов В. Л. Низкочастотное возбуждение в мощном СВЧ транзисторном каскаде // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2. – С. 33-39.
5. Герасимов А. О., Синкевич В. Ф., Миннебаев В. М., Редька Ал. В. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN СВЧ транзисторах: опыт изго-

*Таблица 1*

**Результаты модельной оценки**

<i>N</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>f</i> , ГГц	$P_{вх1}/1$ , Вт	$P_{но}$ , Вт	$K_{но}$	$P_{н10}$ , Вт	$K_{н10}$	$P_{но1}$ , Вт	$K_{но1}$	$P_{н11}$ , Вт	$K_{н11}$
1,0	80/40	1524	0,09	1485	0,15	1392	0,11	1356	0,22
1,5	100/50	1002	0,05	981	0,10	933	0,07	910	0,17

товления // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 1 (228). – С. 30-37.

### References

1. Evstigneev A. S., Kolodko G., Aronov V. L., Kravtsov L., Polyakov S., Shishkan A. Fullrange Module of on-board L-band active phased antenna array. *Fazotron* [Phasotron], 2011, № 3-4 (16), pp. 65-69.
2. Aronov V. L., Evstigneev A. A. Simulation of power bipolar transistor in amplifying mode with quasi-saturation. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices], 2005, № 1-2, pp. 24-33.
3. Aronov V. L., Grigoryan R. M., Evstigneev A. A., Korenkov I. V. Multi-purpose synthesis of power microwave transistor stage. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices], 2011, № 1, pp. 3-18.
4. Aronov V. L. Low-frequency excitation in power microwave transistor stage. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices], 2009, № 2, pp. 33-39.
5. Gerasimov A. O., Sinkevich V. F., Minnebaev V. M., Redka Al. V. GaN microwave transistor X-band pulse power amplifier: fabrication. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices], 2012, № 1 (228), pp. 30-37.