

*Б. Н. БОНДАРЕНКО, В. Г. КРЫЖАНОВСКИЙ, И. Б. МАКАРЕНКО*

### **ТРАНЗИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СВЧ-МОЩНОСТИ С НАСТРОЙКОЙ ПО ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ**

Одно из основных направлений совершенствования транзисторных усилителей СВЧ-мощности (ТУМ СВЧ) — повышение КПД и линейности усиления. В связи с этим актуален поиск режимов работы и схем ТУМ СВЧ, в которых могут быть улучшены эти параметры. Использование в усилителе согласующих цепей с настройкой по второй гармонике приводит к увеличению КПД и снижению интермодуляционных искажений усиливаемого сигнала [1, 2].

Влияние настройки по второй гармонике на характеристики ТУМ СВЧ исследовано на макете, который состоит из двух одинаковых согласующих цепей, включенных на входе и выходе транзистора. Каждая согласующая цепь представляет собой три связанные линии (рис. 1), помещенные между двумя проводящими плоскостями (экранами). Конфигурация и заполнение таких связанных линий обуславливают распространение ТЕМ-волны.

Две связанные линии имеют длину приблизительно  $\lambda/8$  на основной частоте ( $f_0=900$  МГц) и нагружены конденсаторами  $C_1, C_2, C_3$ . Изменение емкости этих конденсаторов обеспечивает согласование импеданса транзистора с линией 50 Ом на основной частоте. Третья (дополнительная) связанная линия длиной  $\lambda/8$  на частоте второй гармонике короткозамкнута с одной стороны и нагружена конденсатором  $C_4$  с другой. Анализ такой согласующей цепи, проведенный в работе [2], показывает, что увеличение емкости  $C_4$  приводит к варьированию в широких пределах реактивной составляющей входного комплексного сопротивления цепи на частоте второй гармоники. При этом входное комплексное сопротивление цепи на основной частоте не изменяется.

В макете использован транзистор КТ911А в режиме класса С ( $E_k=28$  В,  $E_0=0$  В). Экспериментальная установка состоит из генератора, двух измерителей мощности, источника напряжения, анализатора спектра С4-27 и фазометра ФК2-12. Согласующие цепи при подаче входной СВЧ-мощности настраивались путем последовательного варьирования емкостей всех конден-

саторов до получения лучших выходных параметров усилителя. Для контроля оптимальной настройки по второй гармонике емкость конденсатора  $C_4$  изменялась в обе стороны от оптимального значения.

В процессе измерений выяснилось, что настройка по второй гармонике входной цепи существенно слабее влияет на харак-

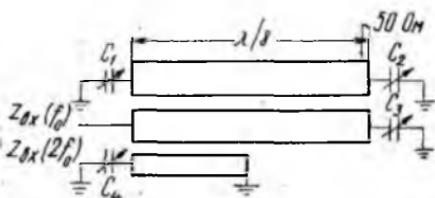


Рис. 1

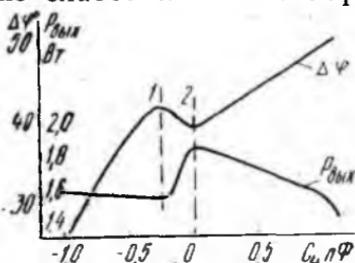


Рис. 2

теристики усилителя, чем настройка выходной цепи. Поэтому все измерения проводились при оптимальной настройке выходной цепи. В случае настройки согласующих цепей на основной частоте ( $f_0=880$  МГц) при  $P_{вх}=240$  мВт максимальный КПД усилителя равен 30,3 %, а коэффициент усиления по мощности  $K_p$  составляет 3,5. Эти же параметры после настройки по второй гармонике равны 48,5 % и 3,9 соответственно. Отметим, что увеличение КПД усилителя происходило вследствие увеличения выходной мощности на основной частоте и уменьшения на 30 мА постоянного тока, потребляемого транзистором. Такая же закономерность улучшения энергетических характеристик наблюдалась, если в усилителе использовались транзисторы КТ911Г, КТ913А.

Рис. 2 показывает зависимость выходной мощности  $P_{вх}$  и фазового сдвига  $\Delta\varphi$  между входным и выходным сигналами на основной частоте от настройки выходной согласующей цепи во второй гармонике. На оси абсцисс за нулевую принята точка, соответствующая настройке на максимальную выходную мощность. Представленная зависимость фазового сдвига монотонна — в области увеличения выходной мощности наблюдается изменение тенденции хода кривой.

На рис. 3 изображены амплитудные и фазоамплитудные характеристики усилителя для двух режимов (без настройки и с настройкой выходной цепи по второй гармонике), обозначенных на рис. 2 цифрами 1, 2. Таким образом, при настройке по второй гармонике амплитудно-фазовая конверсия выражена слабее во всем диапазоне выходной мощности. Частотная характеристика для режимов 1, 2 усилителя дана на рис. 4.

Изучение интермодуляционных искажений проводилось в следующем режиме: разнос частот  $\Delta f=1$  МГц, выходная мощность

$P_{\text{вых}} = 550$  мВт, коэффициент усиления  $K_p = 3,5$ . При настройке по второй гармонике уровень интермодуляционных искажений третьего порядка относительно основного сигнала уменьшился от  $-17$  до  $-35$  дБ. Эффект уменьшения интермодуляционных искажений при настройке по второй гармонике сложным обра-

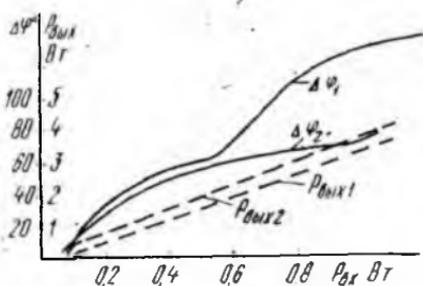


Рис. 3

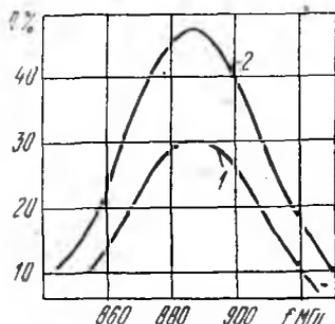


Рис. 4

зом зависит от таких факторов, как разнос частот, выходная мощность, настройка цепи, выбор режима по постоянному току.

Увеличение коэффициента усиления по мощности и КПД ТУМ СВЧ при настройке по второй гармонике можно объяснить возникновением параметрических явлений в транзисторе. Существенно нелинейный характер емкостей  $p-n$ -переходов транзистора обуславливает справедливость такой предпосылки. В работе [3] проведен анализ эквивалентной схемы усилителя, представленной генератором коллекторного тока, при условии, что емкость коллекторного перехода определяется только барьерной емкостью (транзистор не работает в режиме насыщения). Показано, что если в схеме выполняется условие  $|z_1(j\omega)| \ll \ll |z_n(jn\omega)|$ , где  $n=2, 3, \dots$ , то происходит изменение коэффициента использования коллекторного напряжения по первой гармонике

$\xi = I_{k1} R_{н}/E_k$  в  $\sigma_n$  раз:

$$\sigma_n \approx 1 + \frac{I_{k1} \alpha_2 \gamma}{4 C_0 \omega_0 \alpha_1 E_k} \cos \left( \frac{\pi}{2} + \varphi_2 - 2\varphi_1 \right).$$

Здесь  $I_{k1}$  — амплитуда первой гармоники коллекторного тока;  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты разложения косинусоидального импульса;  $\gamma$  — коэффициент, зависящий от характера  $p-n$ -перехода;  $C_0$  — емкость перехода при напряжении, равном  $E_k$ ;  $\omega_0$  — частота первой гармоники,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $E_k$  — напряжение питания коллектора;  $\varphi_1, \varphi_2$  — фазы первой и второй гармоник коллекторного тока.

Соответственно в  $\sigma_n$  раз изменяется КПД усилителя:

$$\eta = \frac{P_1}{P_{к0}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \xi \sigma_n.$$

Как показывает оценка величины  $\sigma_n$ , полученная в работе [3], при выборе оптимального соотношения между фазами гармоник в ТУМ СВЧ его КПД можно увеличить в 1,2 раза. Экспериментальный результат увеличения КПД в 1,6 раза указывает на то, что анализ с учетом влияния барьерной емкости коллекторного перехода только в первом приближении можно использовать для описания работы ТУМ СВЧ. Эффект улучшения энергетических характеристик усилителя при выборе оптимального импеданса согласующих цепей на частоте второй гармоники является результатом нелинейных процессов в транзисторе. Последние обусловлены нелинейными зависимостями коллекторного тока от напряжения на переходе эмиттер—база, диффузионной и барьерной емкостей  $p-n$ -переходов от напряжения, граничной частоты транзистора от коллекторного тока и напряжения, модуляцией ширины базы.

Физически увеличение КПД объясняется параметрическим преобразованием мощности второй гармоники в мощность сигнала основной частоты. ТУМ СВЧ с настройкой по второй гармонике подобно одноконтурному параметрическому генератору обладает свойством фазовой избирательности. Частотные условия синхронного режима  $\omega_n = 2\omega_0$  выполняются автоматически, а фазовые условия регулируются подстройкой согласующих цепей по второй гармонике. В согласующей цепи (см. рис. 1) имеется дополнительная связанная линия, электрическая длина которой перестраивается конденсатором  $C_4$ , что позволяет изменять фазу отраженной и проходящей волн второй гармоники. Возвращаясь в транзистор с определенным фазовым сдвигом относительно волны первой гармоники, эта отраженная волна действует как сигнал накачки, обеспечивающий параметрическое усиление мощности сигнала первой гармоники. Дополнительный фазовый сдвиг между первой и второй гармониками вызывает изменение формы импульса коллекторного тока. На это указывают наблюдаемые наряду с улучшением энергетических характеристик ТУМ СВЧ уменьшение интермодуляционных искажений и снижение амплитудно-фазовой конверсии.

Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о том, что режим работы ТУМ СВЧ в классе С — необходимое, но не достаточное условие реализации высокого КПД. Если при проектировании согласующих цепей не принять во внимание свойство фазовой избирательности усилителя, это приведет к существенному ухудшению характеристик ТУМ СВЧ. Описанная согласующая цепь позволяет при настройке по второй гармонике улучшить параметры усилителя. При настройке ТУМ СВЧ в оптимальный режим работы необходимо контролировать фазоамплитудную характеристику.

**Список литературы:** 1. *Mazumber S. R., Azize A., Gardiol F. E.* Improvement of a Class-C Transistor Power Amplifier by Second-Harmonic Tuning//Gnst. of Electrical and Electronic eng. Trans. of MTT, 1979. MTT-27. N 5. P. 430—433.  
2. *Транзисторный усилитель СВЧ с настройкой по второй гармонике/* Б. Н. Бондаренко, В. Г. Крыжановский, И. Б. Макаренко, М. Ф. Степко. Донецк, 1983. С. 22. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 473-83 Деп. 3. *Каганов В. И.* Транзисторные радиопередатчики. М., 1976. 448 с.

*Поступила в редколлегию 07.06.85.*