

ISSN 0453-8048

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ВІСНИК**  
**ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ**  
**імені В.Н. КАРАЗІНА**

№ 570

**РАДІОФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА**

**Випуск 2' 2002**

**Radiophysics and Electronics**

ХАРКІВ  
2002

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА НА РЕЗОНАНСНУЮ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВУЮ СИСТЕМУ О-ТИПА

**Е.Н.Одаренко, А.А.Шматько**

*Харьковский национальный университет, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина*

Тел.: +380 (572) 457-424

e-mail: evgeniy.n.odarenko@univer.kharkov.ua

alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua

Рассмотрены характеристики стационарного режима резонансной электронно-волновой системы с внешним параметрическим воздействием. Теоретическое исследование физических процессов проведено в рамках многомерной нелинейной модели взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем. Основное внимание уделено анализу закономерностей влияния мощности внешнего сигнала на характеристики колебательной системы. Установлено, что преобразование амплитудно-частотных характеристик прибора в случае достаточно мощного внешнего воздействия обусловлено изменением средней крутизны колебательной характеристики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** неавтономные колебательные системы, резонансные характеристики, комплексная крутизна колебательной характеристики, многомерная самосогласованная теория.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения мощности электронных приборов СВЧ и мм диапазона непосредственно связана с вопросами усиления и преобразования сигналов, имеющих значительную амплитуду. Вместе с тем, достаточно подробно теоретически исследованы неавтономные системы с так называемым слабым внешним воздействием в одномерном приближении [1-2]. Использование такого приближения вполне оправдано для широкого круга задач анализа электронно-волновых систем, поскольку оно упрощает моделирование физических процессов. Однако в многокаскадных схемах приборов даже средней мощности это приближение применимо только в первых секциях пространства взаимодействия. Выходные каскады находятся уже под воздействием довольно мощных сигналов. В такой ситуации необходимо использовать модель электронно-волнового взаимодействия, пригодную для произвольного уровня амплитуды высокочастотных полей на всех участках пространства взаимодействия.

Следует отметить, что теория неавтономных резонансных приборов О-типа с подачей внешнего сигнала непосредственно в пространство взаимодействия не накладывает ограничений на уровень входного сигнала [3]. Однако в многокаскадных схемах связь осуществляется обычно по электронному потоку, поэтому отмеченная теория может использоваться только для анализа процессов в модуляторных каскадах.

В данной работе рассматривается одна из возможных гибридных схем О-типа с длительным взаимодействием, где в качестве выходного каскада используется прибор типа оротрон-ГДИ. Исследуется параметрическое воздействие входных сигналов различной амплитуды на характеристики выходного резонансного каскада.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель исследуемой системы состоит из нескольких участков пространства электронно-волнового взаимодействия, которые различаются по типу энергообмена между заряженными частицами и высокочастотными полями (резонансный и нерезонансный). Модулятор в общем случае представляет собой гибридную структуру с ленточным электронным потоком толщины  $\delta$ . Таким образом, здесь помимо модуляции пучка по скорости и плотности возможно предварительное усиление сигнала. Выходной каскад – резонансный прибор О-типа с длительным взаимодействием.

Анализ закономерностей физических процессов в электронно-волновой системе проводится на основе нелинейной самосогласованной теории, основные положения которой изложены в [4].

Развитая теория в отличие от [1, 2] позволяет учитывать явления, обусловленные многомерностью пространства взаимодействия в нерезонансных и резонансных системах: трехмерное движение электронов, высокочастотное расслоение пучка, оседание электронов на поверхность электродинамической системы прибора, взаимодействие электронного потока с поперечными компонентами высокочастотных и статических полей, статические и динамические поперечные смещения траекторий электронов, пространственная неоднородность фокусирующих полей и др.

Выпишем исходную систему уравнений, которая включает в себя уравнения для резонансных и нерезонансных участков пространства взаимодействия:

$$\frac{dF_C}{dt} + [1 - i\Delta\omega - GS]F_C = a \exp(i\varphi); \quad (1)$$

$$\frac{dF_C}{d\xi} + [d + i\Delta v - R\hat{S}(\xi)]F_C = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d\eta_Y(\xi)}{d\xi} = -\operatorname{Re}[F_C(\xi)\Psi_Y(Z)\exp(i\alpha) + E_{qY} - 2\Omega^2 B_Z V_X]; \quad (3)$$

$$\frac{d\eta_Z(\xi)}{d\xi} = \operatorname{Re}[iF_C(\xi)\Psi_Z(Z)\exp(i\alpha) + E_{qZ} - 2\Omega^2 B_Y V_X]; \quad (4)$$

где используются следующие обозначения:

$$S = S_1 + iS_2 = \frac{1}{2} \int_0^1 f(\xi)\hat{S}(\xi) \exp(i\Delta v) d\xi; \quad \hat{S}(\xi) = \frac{H}{\pi F \delta} \int_0^{2\pi} \int_Z [\Psi_Y(Z) - i \frac{2}{\Phi} \frac{dZ}{d\xi} \Psi_Z(Z)] \exp(i\alpha) dZ_0 d\varphi_0; \quad (5)$$

$$V_X = \frac{2}{\Phi} (Z - Z_0) B_Y - \int_0^\xi B_Z(\xi') d\xi'; \quad \alpha = \theta + \Delta v \xi + \varphi_0; \quad F_C(\xi) = F(\xi) \exp(-i\gamma);$$

$S$  - средняя комплексная крутизна колебательной характеристики;  $\hat{S}$  - погонная крутизна колебательной характеристики;  $F$  и  $\gamma$  - амплитуда и фаза поля;  $\eta_Y(\xi)$  и  $\eta_Z(\xi)$  - текущие значения продольного и поперечного электронного КПД;  $\theta = \omega t - \Phi\xi - \varphi_0$ ;  $\Phi = \frac{\omega L}{v_0}$ ;  $L$  - длина пространства взаимодействия;

$\xi = \frac{y}{L}$  и  $Z = \frac{z}{H}$  - нормированные на соответствующий масштаб продольная и поперечная координаты;

$f(\xi)$  - фиксированное продольное распределение амплитуды высокочастотного поля, форма которого определяется симметрией электродинамической системы;  $\Psi_Y$  и  $\Psi_Z$  - поперечные амплитудные

распределения компонент высокочастотного поля;  $\Delta v = (1 - \frac{v_0}{v})\Phi$ ;  $v_0$  - начальная продольная скорость электронов;  $v$  - фазовая скорость замедленной волны;  $E_{qY}$  и  $E_{qZ}$  - продольная и поперечная

компоненты поля пространственного заряда;  $\Omega = \Phi \frac{\omega_c}{\omega}$ ;  $\omega_c$  - циклотронная частота;  $a$  и  $\varphi$  -

амплитуда и фаза внешнего сигнала, который подается непосредственно в резонатор;  $G$  - параметр эффективности взаимодействия в резонансном приборе;  $R$  - параметр эффективности взаимодействия для нерезонансного прибора, имеющий тот же смысл, что и параметр Пирса в ЛБВ;  $d$  - параметр

затухания;  $\Delta\omega = 2Q \frac{\omega - \omega_r}{\omega_r}$ ;  $\omega_r$  - собственная частота рабочей моды;  $\tau = \frac{\omega_r}{2Q} t$ ;  $Q$  - добротность;  $B_Y$  и

$B_Z$  - компоненты вектора индукции фокусирующего магнитостатического поля, которые в общем случае являются функциями координат, т.е. характеризуют пространственное распределение силовых линий неоднородного поля. Следует отметить, что, поскольку в выходном каскаде отсутствует внешнее силовое воздействие, то при его исследовании следует в уравнении возбуждения (1) положить  $a = 0$ .

Функции  $\theta$ ,  $Z$ ,  $d\theta/d\xi$ ,  $dZ/d\xi$  являются решениями уравнений движения с соответствующими для каждого участка пространства взаимодействия начальными условиями. Выходной каскад работает с предварительной модуляцией электронного потока и информацию о характеристиках усиливаемого сигнала получает косвенно - через решения системы уравнений движения в модуляторе. Определение амплитуды сигнала в модуляторе (амплитудного распределения высокочастотного поля) происходит при решении самосогласованной задачи об электронно-волновом взаимодействии.

Исследуемая теоретическая модель построена безотносительно к уровню высокочастотного сигнала. Это позволяет исследовать влияние величины амплитуды входного сигнала и характеристик модулирующих участков пространства взаимодействия на характеристики гибридного прибора и, в частности, на характеристики выходного резонансного каскада.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим результаты расчетов для стационарного режима гибридного прибора, выходной каскад которого выполнен на открытом резонаторе. В этом случае огибающая  $f(\xi)$  имеет фиксированную гауссовскую форму. Поперечная огибающая  $\mathcal{U}(Z)$  характеризует экспоненциальное убывание амплитуды поля при удалении от поверхности замедляющей системы – гребенки.

На рис. 1 представлены зависимости средней крутизны амплитудной колебательной характеристики  $S_1$  (действительная часть средней комплексной крутизны (6)) от амплитуды стационарных колебаний  $F$  для различных значений мощности входного сигнала  $P_0$ , параметра пространственного рассинхронизма  $\Delta v$  и фазы колебаний  $\gamma$ . Пунктирными кривыми обозначены зависимости  $S_1(F)$  для автономного генератора. Наибольшие различия в значениях средней крутизны колебательной характеристики для автономного и неавтономного приборов наблюдаются для малых значений амплитуды  $F$ . В этом случае закономерности группирования электронного потока в значительной мере определяются характеристиками модулятора. С увеличением амплитуды колебаний интенсивность энергообмена нарастает и определяющим фактором фазировки электронов становится высокочастотное поле резонатора, структура которого практически одинакова для автономного и неавтономного режимов.

Из графиков на рис. 1 также следует, что значительное влияние на зависимости  $S_1(F)$  оказывает стационарное значение фазы колебаний. В случае мягкого режима возбуждения колебаний ( $\Delta v = -\pi$ ) и малой мощности входного сигнала ( $P_0 = -60$  dB) наиболее энергетически выгодным оказывается значение  $\gamma = \pi$ . Отметим, что при возбуждении ЛБВ модулированным потоком электронов на входе лампы также формируется противофазное поле [5], что приводит к повышению эффективности взаимодействия. В резонансном приборе значение фазы определяется расстройкой  $\Delta\omega$  между частотой внешнего сигнала и собственной частотой рабочей моды резонатора, а также амплитудой колебаний. Поэтому закономерности воздействия фазы  $\gamma$  на самосогласованный процесс энергообмена непосредственно определяют частотные свойства электронно-волновой системы.

В случае жесткого режима возбуждения ( $\Delta v = -8\pi/3$ ) оптимальное значение фазы вынужденных колебаний изменяется. Для входных сигналов малой мощности средняя крутизна амплитудной колебательной характеристики максимальна при синфазном возбуждении выходного участка пространства взаимодействия ( $\gamma = 0$ ). Для более мощных входных сигналов предпочтительным оказывается значение  $\gamma = 1.5\pi$ .

Таким образом, закономерности возбуждения выходного резонансного участка гибридного прибора определяются как нелинейностью самой этой секции, так и нелинейностью модулирующих участков. Совместное воздействие этих факторов иллюстрируется на рис. 1(г).

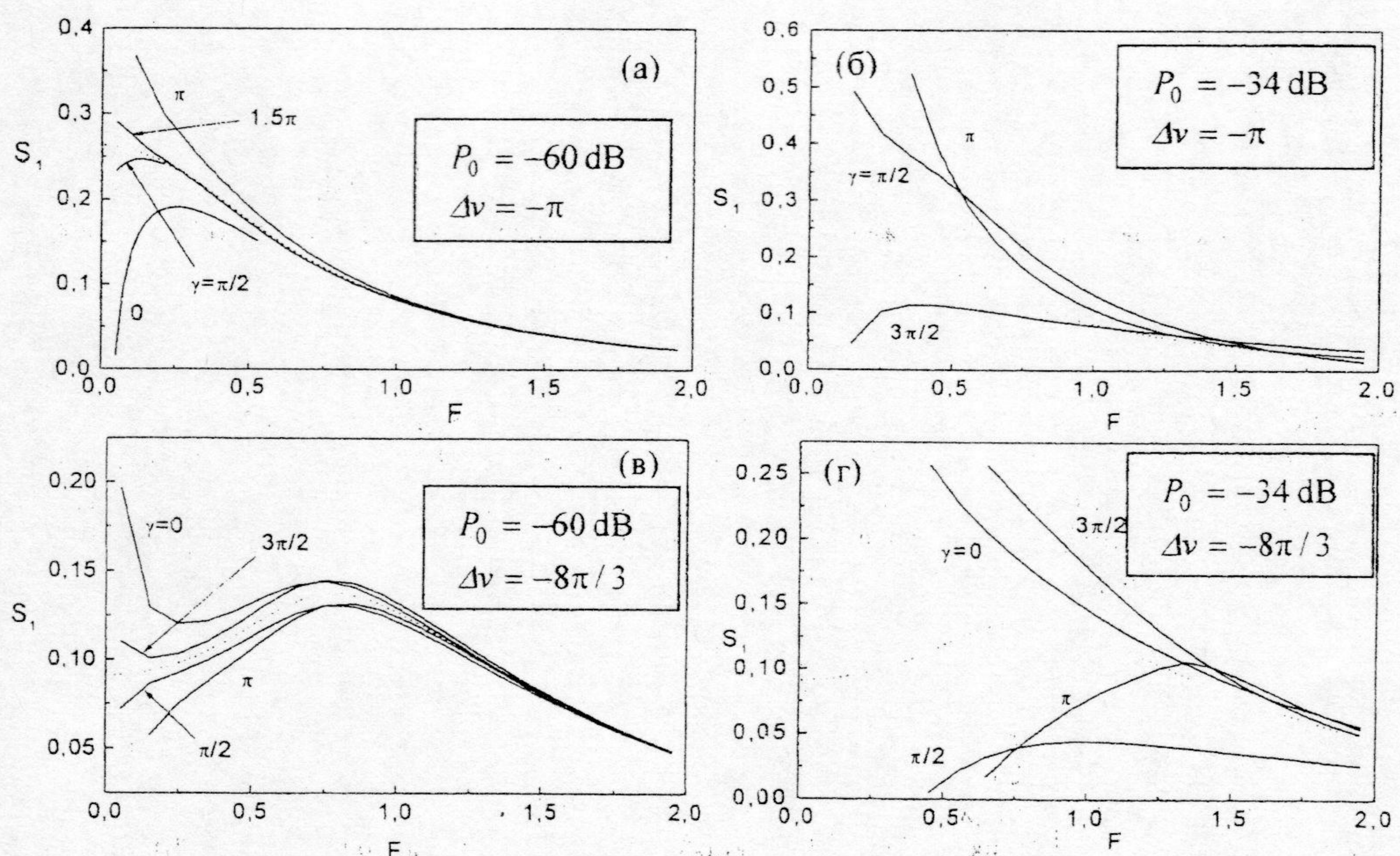


Рис. 1. Средняя крутизна амплитудной колебательной характеристики для различных значений параметров системы.

На рис. 2 представлены амплитудно-частотные характеристики выходного резонансного участка пространства взаимодействия для различных значений мощности входного сигнала  $P_0$ . Сплошные и пунктирные кривые соответствуют устойчивым значениям стационарной амплитуды колебаний, штриховые – неустойчивым. Штрих-пунктиром показаны «скелетные» кривые, которые соответствуют автономной колебательной системе. Графики на рис. 2(а) построены для режима регенеративного усиления, на рис. 2(б) – для режима принудительной синхронизации. Пунктирные кривые на рис. 2(а) соответствуют жесткому режиму возбуждения колебаний, сплошные кривые – мягкому.

В зависимости от режима возбуждения колебаний наблюдаются различные закономерности воздействия входных сигналов различной мощности на избирательность резонансной системы. В случае мягкого режима реализуется характерная для неавтономных колебательных систем ситуация, когда увеличение мощности внешнего сигнала приводит к ухудшению частотно-избирательных свойств – максимум резонансной кривой становится более пологим (рис. 2(а)). В жестком режиме возбуждения наибольшая избирательность наблюдается для входного сигнала довольно большой мощности, соответствующей максимальной мощности выходного сигнала.

Следует отметить, что увеличение  $P_0$  сопровождается смещением максимума резонансных характеристик от скелетной кривой. Очевидно, что этот эффект обусловлен изменением зависимостей средней крутизны колебательной характеристики от амплитуды и фазы колебаний за счет мощного внешнего сигнала, поступающего на вход каскада. Фактически происходит изменение реактивности, вносимой электронным потоком в резонансную колебательную систему. Аналогичное явление наблюдается в режиме принудительной синхронизации (рис. 2(б)), причем даже для сравнительно малой мощности внешнего сигнала ( $P_0 = -46$  дБ) нарушается симметрия резонансной характеристики относительно скелетной кривой.

Кроме того, увеличение  $P_0$  приводит к расширению полосы синхронизации, причем для  $P_0 = -26$  дБ устойчивыми оказываются колебания для всех значений  $\Delta\omega$  аналогично режиму регенеративного усиления. Как показывают результаты дополнительных расчетов, причиной этого эффекта является сужение диапазона возможных значений фазы колебаний  $\gamma$  при увеличении  $P_0$ , что приводит к смещению всех стационарных решений уравнения (1) в область устойчивости на фазовой плоскости.

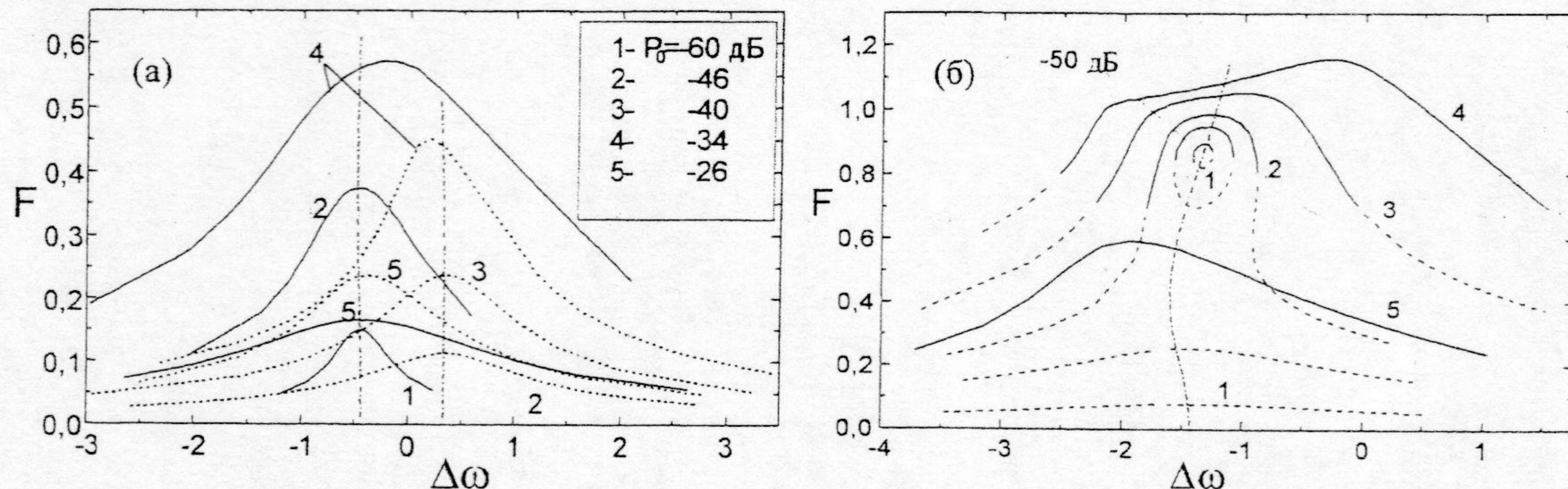


Рис. 2. Резонансные характеристики неавтономной колебательной системы для различных значений мощности внешнего воздействия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в случае сравнительно мощных входных сигналов необходимо учитывать нелинейность процессов не только в выходной секции прибора, но и в модулирующих секциях, что приводит к появлению новых закономерностей динамики многомерных неавтономных систем. Отмеченные эффекты обусловлены изменением средней комплексной крутизны колебательной характеристики системы за счет внешнего высокочастотного параметрического воздействия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ергаков В.С., Моисеев М.А., Эрм Р.Э. // Изв. вузов. Радиопизика. 1976. 19. № 3. С. 453-459.
2. Теория резонансных усилителей с распределенным взаимодействием / Ваврив Д.М., Третьяков О.А., РИ АН УССР. Киев: Наук. думка. 1989. 152 с.
3. Шматько А.А. // Радиотехника и электроника. 1985. 30. № 4. С. 761-768.
4. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // Вісник ХНУ. № 513. Радіофізика та електроніка. 2001. Вип. 1'2001. С. 81-85.
5. Филимонов Г.Ф., Бадлевский Ю.Н. Нелинейное взаимодействие электронных потоков и радиоволн в ЛБВ. М. Сов. радио. 1971. 184 с.