

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

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНОГО РЕЖИМА ПРИБОРОВ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ – ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В.С. Мирошниченко<sup>1</sup>, Е.Н. Одаренко<sup>2</sup>, А.А. Шматько<sup>2</sup>

1. Институт радиофизики и электроники НАН Украины, ул. Акад. Проскуры, 12, Харьков, 61085, Украина  
2. Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина

Теоретически и экспериментально проведен анализ нелинейных режимов работы приборов дифракционной электроники с использованием метода колебательных характеристик. Определены основные выходные характеристики электронно-волновой системы на основе средней крутизны колебательной характеристики резонансного прибора. Показано хорошее соответствие результатов, полученных в рамках многомерной самосогласованной теории, и экспериментальных данных, полученных на макете генератора дифракционного излучения 8-мм диапазона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** средняя крутизна колебательной характеристики, коэффициент усиления, генератор дифракционного излучения, нелинейный режим.

### ВВЕДЕНИЕ

Для расчета выходных характеристик нелинейных электронно-волновых систем дифракционной электроники (оротрон, генератор дифракционного излучения (ГДИ), ледатрон и др.) в автономном и неавтономном режиме был развит метод колебательных характеристик и введено понятие их средней комплексной крутизны [1, 2]. Этот метод оказался плодотворным при теоретических и экспериментальных исследованиях для приборов малой и средней мощности мм диапазона. Метод основывается на определении (теоретически или экспериментально) базовой характеристики – средней комплексной крутизны колебательной характеристики  $S(\sqrt{P})$  ( $P$  – мощность колебаний), знание которой позволяет находить основные эксплуатационные характеристики приборов: пусковой ток, выходную мощность, КПД, электронное смещение частоты, коэффициент усиления.

Одним из основных преимуществ этого метода является его универсальность. Фактически, если известен вид нелинейности резонансной электронно-волновой системы (из теории или эксперимента), то можно относительно просто прогнозировать выходные характеристики приборов различных типов.

В данной работе метод колебательных характеристик применяется для теоретического и экспериментального определения выходных характеристик генераторов и усилителей дифракционного излучения. Кроме того, проводится сравнение теоретических результатов и экспериментальных данных для различных режимов работы прибора.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В теории метод колебательных характеристик позволяет получить уравнение для амплитудно-частотной характеристики неавтономной резонансной электронно-волновой системы для случая внешнего высокочастотного силового воздействия [2]:

$$\Delta\omega = -GS_2(F) \pm \sqrt{\left(\frac{a_c}{F}\right)^2 - [1 - GS_1(F)]^2} ; \quad (1)$$

где  $G = \frac{2Q_L L^2 I}{\omega_r N_r U}$  – параметр эффективности взаимодействия пучка с полем;  $\Delta\omega = \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_r}\right) 2Q_L$ ;

$S(F) = S_1(F) + iS_2(F)$  – комплексная средняя крутизна колебательной характеристики прибора;  $a_c$  – амплитуда внешнего сигнала;  $\omega_r$  – резонансная частота “холодного” резонатора;  $F$  – безразмерная амплитуда колебаний;  $L$  – длина пространства взаимодействия;  $I$  – рабочий ток электронного пучка;  $N_r$  – норма колебаний;  $U$  – ускоряющее напряжение;  $Q_L$  – нагруженная добротность. В рамках многомерной теоретической модели электронно-волнового взаимодействия [3] среднюю комплексную крутизну колебательной характеристики можно представить следующим образом:

$$S = \frac{H}{2\pi F \delta} \int_0^1 f(\xi) \int_{z_1}^{z_2} \Psi(Z) \int_0^{2\pi} \left(1 - i \frac{H}{L} \frac{dZ}{d\xi}\right) \exp[i(\theta + \Phi b \xi + \varphi_0)] d\varphi_0 dZ_0 d\xi; \quad (2)$$

где  $H$  - поперечный масштаб;  $\delta$  - толщина ленточного электронного потока;  $\xi$  и  $Z$  - продольная и поперечная безразмерные координаты;  $f(\xi)$  и  $\Psi(Z)$  - функции, описывающие амплитудное распределение высокочастотного поля в резонаторе;  $\theta$  - изменение фазового положения электрона за счет взаимодействия с высокочастотным полем;  $\Phi b$  - параметр рассинхронизма начальной скорости пучка и фазовой скорости замедленной волны;  $\varphi_0$  - начальная фаза.

Второе слагаемое в подкоренном выражении уравнения (1) определяет максимальный коэффициент усиления  $K_{\text{макс}} = [1 - GS_1(F)]^{-2}$ . Коэффициент усиления регенеративного усилителя дифракционно-го излучения с учетом внешней цепи можно представить в виде:

$$K = \frac{\left[ \frac{\beta - 1}{\beta + 1} + \frac{I}{I_{\text{пуск}}} \frac{U_{\text{пуск}}}{U} \frac{S_1(F)}{S_1(0)} \right]^2}{\left[ 1 - \frac{I}{I_{\text{пуск}}} \frac{U_{\text{пуск}}}{U} \frac{S_1(F)}{S_1(0)} \right]^2}; \quad (3)$$

где  $\beta$  - коэффициент связи резонатора с передающей линией;  $I_{\text{пуск}}$ ,  $U_{\text{пуск}}$  - ток и ускоряющее напряжение пучка для пускового режима ГДИ;  $S_1(0)$  - значение средней крутизны амплитудной колебательной характеристики для пускового режима.

В эксперименте семейство кривых  $S(\sqrt{P}) = S_1(\sqrt{P}) + iS_2(\sqrt{P})$  определялось из характеристик автономного режима ГДИ. Для этого находились зависимости мощности, выводимой в нагрузку,  $P_{\text{вых}}$  и электронного смещения частоты  $\Delta\omega$  от тока пучка  $I$  для нескольких значений ускоряющего напряжения ( $U = U_1, U_2 \dots U_k$ ). Тогда для  $S_1(\sqrt{P_{\text{вых}}})$  и  $S_2(\sqrt{P_{\text{вых}}})$  справедливы соотношения:

$$S_1(\sqrt{P_{\text{вых}}}) = \frac{1}{R_0} \frac{U}{I(\sqrt{P_{\text{вых}}})}, \quad (4)$$

$$S_2(\sqrt{P_{\text{вых}}}) = \frac{2Q_L}{\omega_r R_0} \frac{\Delta\omega(\sqrt{P_{\text{вых}}})U}{I(\sqrt{P_{\text{вых}}})}, \quad (5)$$

где  $R_0 = \frac{2Q_L L^2}{\omega_r N_r}$ . Поскольку для расчета коэффициента усиления  $K$  достаточно знать только

относительные значения средней крутизны амплитудной колебательной характеристики  $S_1(\sqrt{P_{\text{вых}}})/S_{1\text{макс}}$ , то соотношения (3), (4) и (5) позволяют рассчитать выходные характеристики генератора и усилителя при любом уровне выходной мощности. Нагруженная добротность  $Q_L$  и коэффициент связи  $\beta$  определяются из "холодных" измерений параметров резонансной системы ГДИ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования выходных характеристик резонансного усилителя и генератора проведено на макете ГДИ-8 с выходной мощностью  $P_{\text{вблх}} = 1,27$  кВт при КПД  $\eta = 18,7\%$  ( $U = 12,2$  кВ;  $I = 0,55$  А). Пусковой ток ГДИ-8 составлял  $I_{\text{пуск}} = 0,064$  А. Характеристики резонансной системы ГДИ-8 следующие:  $Q_L = 750$ ;  $\beta = 3,0$ .

Результаты теоретических расчетов средней крутизны амплитудной колебательной характеристики  $S_1(F)$  и соответствующие экспериментальные данные представлены на рис. 1. Кривыми показаны результаты теоретических расчетов для различных значений параметра рассинхронизма  $\Phi b$ . На рисунке

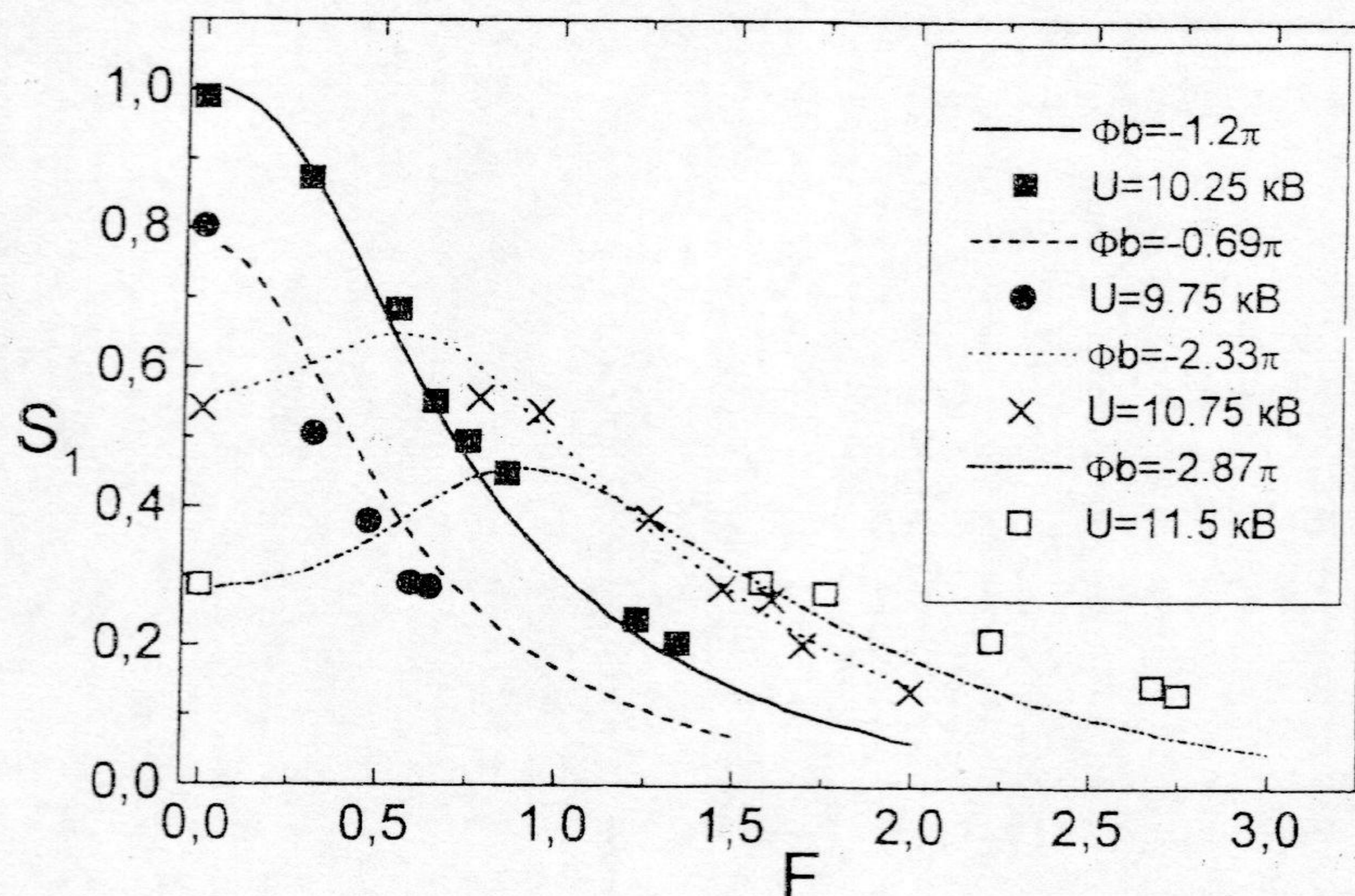


Рис. 1. Зависимости средней крутизны амплитудной колебательной характеристики от амплитуды колебаний для различных значений ускоряющего напряжения пучка.

изображены нормированные на максимальное значение  $S_1$  (соответствующее минимальному пусковому току) зависимости средней крутизны амплитудной колебательной характеристики от амплитуды колебаний. Привязка теоретических результатов и данных измерений проводилась по нормированным значениям  $S_1(0)$ , которые непосредственно связаны с пусковым током прибора. Соответствие между амплитудой  $F$  и значениями  $\sqrt{P_{\text{вблх}}}$  устанавливалось через коэффициент пропорциональности, который определялся в точке совпадения теоретического и экспериментального значений средней крутизны амплитудной колебательной характеристики.

Рис. 1 иллюстрирует вполне удовлетворительное соответствие между теорией и экспериментом как для мягкого, так и для жесткого режима возбуждения колебаний. Это свидетельствует о достоверности результатов, полученных в рамках выбранной многомерной теоретической модели, и ее адекватности происходящим в приборе физическим процессам.

Рассмотрим далее результаты исследования автономного и неавтономного режима работы электронно-волновой системы, проведенного на основе метода колебательных характеристик.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик прибора является КПД. В теории электронно-волнового взаимодействия обычно рассматривается электронный КПД, который выражается через относительное изменение кинетической энергии электронного потока. В эксперименте определяется полный или промышленный КПД, характеризующий эффективность преобразования энергии источника питания в энергию высокочастотного электромагнитного поля в выходном устройстве прибора. Коэффициент пропорциональности между электронным и полным КПД называется контурным КПД.

На рис. 2 представлены зависимости максимального по зоне генерации КПД от нормированного на пусковой ток значения рабочего тока пучка. Результаты экспериментальных измерений полного КПД показаны затемненными квадратами. Штриховой кривой на рисунке нанесена зависимость для электронного КПД  $\eta_e = F^2 S_1(F)$ , который характеризует эффективность электронно-волнового взаимодейст-

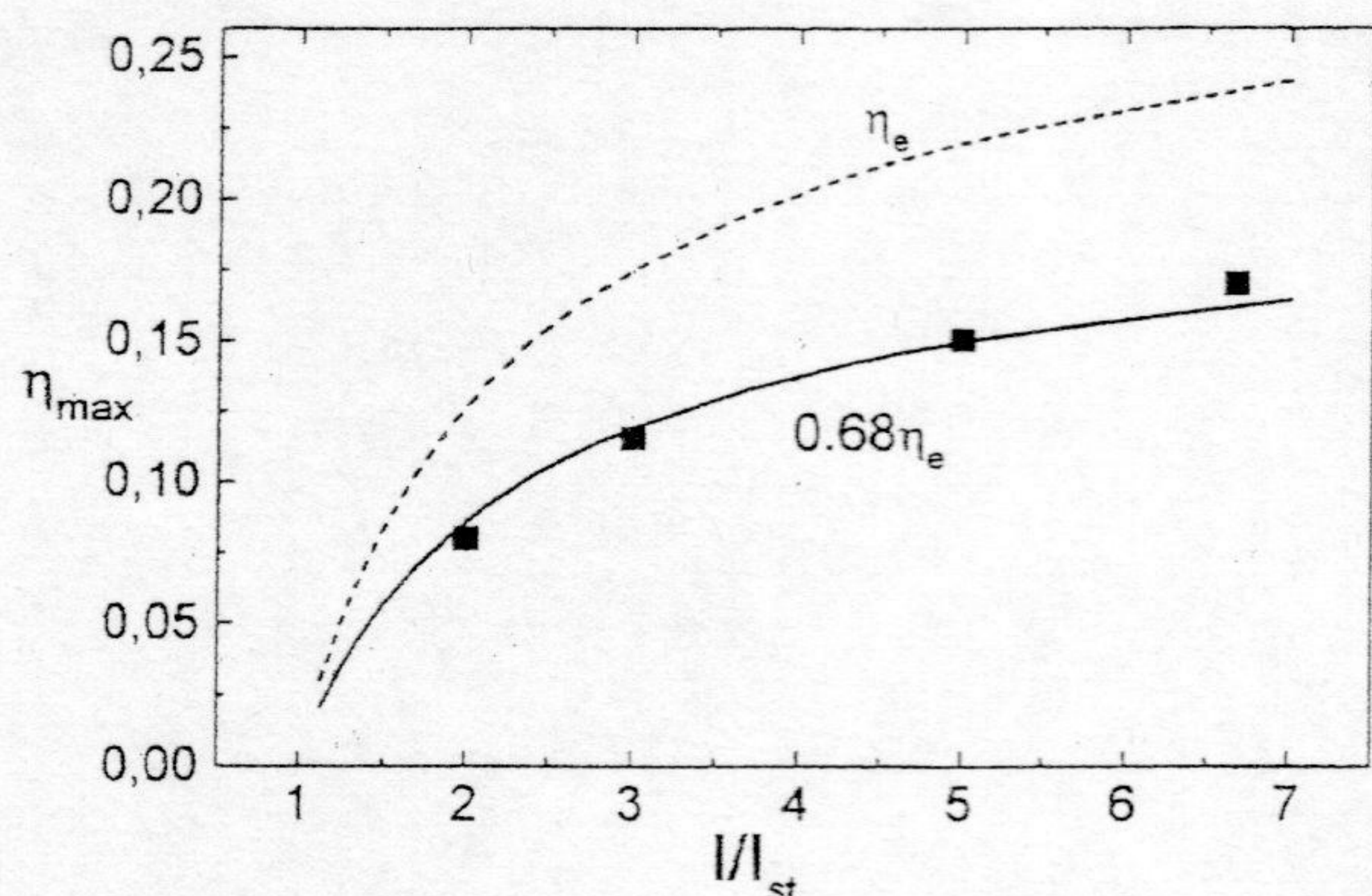


Рис. 2. Зависимости КПД от нормированного тока пучка.

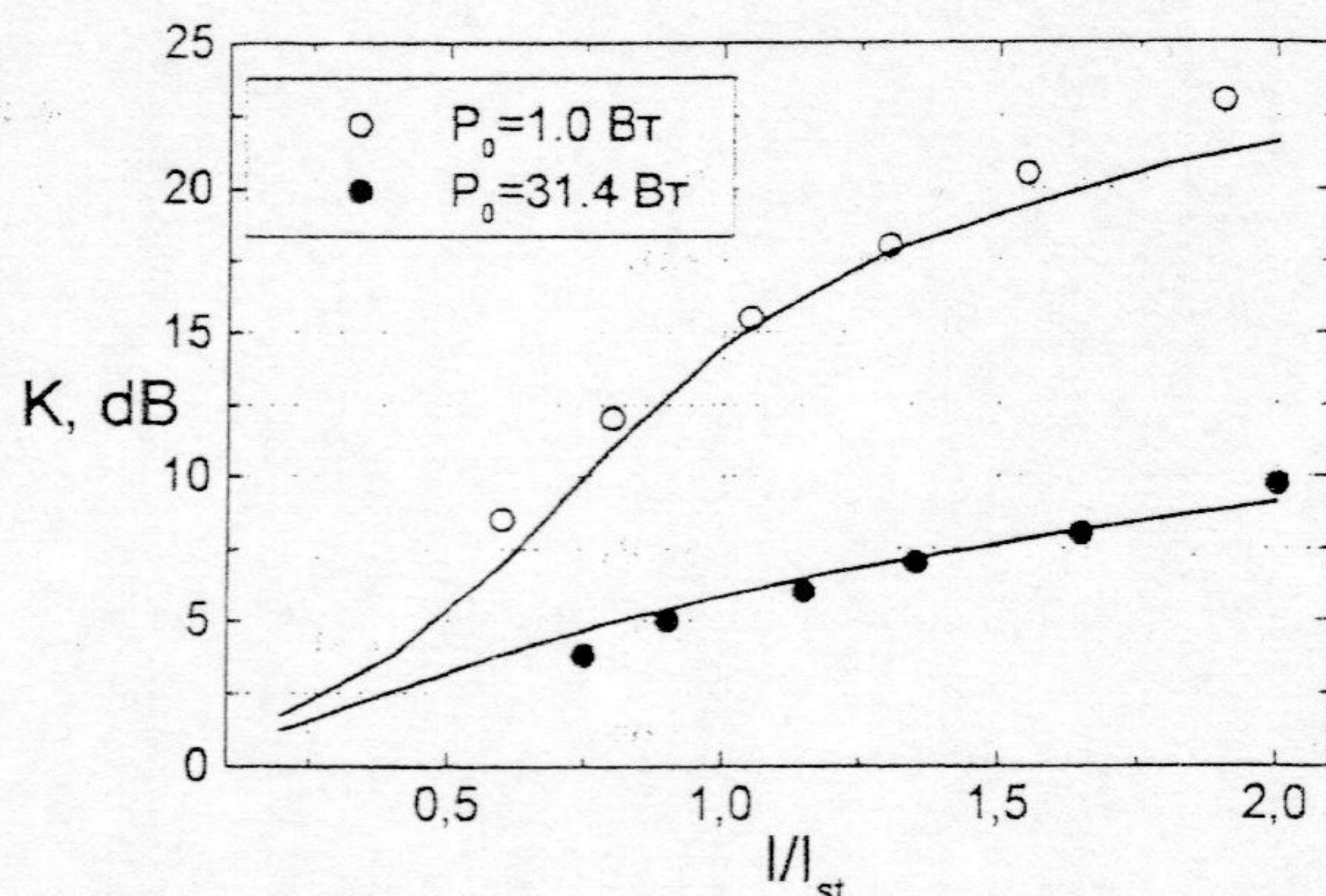


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления от нормированного тока пучка.

вия, сплошной кривой - зависимость  $0.68\eta_e \left( \frac{I}{I_{пуск}} \right)$ , которая хорошо согласуется с эксперименталь-

ными данными. Следовательно, в данном случае можно оценить величину контурного КПД ( $\approx 68\%$ ).

Таким образом, рассчитывая на основе метода колебательных характеристик электронный КПД и зная контурный КПД для определенной конструкции электронно-волновой системы, можно довольно точно теоретически определять значения полного КПД и выходной мощности прибора для различных значений тока пучка.

Основной энергетической характеристикой прибора в неавтономном режиме является коэффициент усиления  $K$ . Были проведены расчеты с использованием выражений (1-5) и определены максимальные значения  $K$  для различных значений отношения рабочего тока к пусковому. При прямых измерениях коэффициента усиления на макете прибора для каждого значения тока пучка производилась подстройка ускоряющего напряжения для получения максимального значения выходной мощности. Измерения были проведены для двух значений мощности входного сигнала:  $P_0 = 1,0$  Вт и  $P_0 = 31,4$  Вт. Для установления соответствия между значением  $\sqrt{P_0}$  и амплитудой внешнего сигнала  $a_c$  использовался коэффициент пропорциональности, определенный ранее при расчете средней крутизны колебательной характеристики.

Результаты расчета коэффициента усиления в децибелах приведены на рис. 3, здесь же приведены результаты прямых измерений  $K$  (точки), проведенные в импульсном режиме ( $\tau_{и} = 10$  мкс). Теоретические значения коэффициента усиления вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными, что позволяет использовать метод колебательных характеристик для полного анализа усилителя без проведения измерений  $K$ . Соответствие между теоретическими результатами и данными эксперимента сохраняется в широком диапазоне изменения мощности входного сигнала для режима регенеративного усиления  $\left( \frac{I}{I_{пуск}} < 1 \right)$  и для режима принудительной синхронизации  $\left( \frac{I}{I_{пуск}} > 1 \right)$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты указывают на эффективность рассмотренного метода для определения выходных характеристик электронных приборов через среднюю крутизну колебательной характеристики как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Кроме того, данный метод позволяет относительно просто проводить сравнение теории и эксперимента в автономном и неавтономном режиме. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования метода колебательных характеристик для исследования и разработки резонансных электронных приборов различных классов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.К.Корниенков, В.С.Мирошниченко, А.А.Шматько // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. 34. № 3. С. 301-308.
2. Шматько А.А. // Радиотехника и электроника. 1985. 30. № 4. С. 761-768.
3. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // Радиотехника и электроника. 1992. 37. № 2. С. 303-310.