

# ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВЫХ СИСТЕМАХ О-ТИПА – МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ

Одаренко Е. Н., Шматько А. А.  
Харьковский национальный университет, пл. Свободы, 4, Харьков-61077, Украина  
Тел.: (0572) 457424; e-mail: evgeniy.n.odarenko@univer.kharkov.ua

**Аннотация** – Проведено теоретическое исследование процессов усиления и синхронизации в многомерной электронно-волновой системе О-типа. Пространство взаимодействия состоит из участков с резонансным и нерезонансным типом энергообмена между электронным потоком и высокочастотным полем. Анализ проводится в рамках единой нелинейной самосогласованной теории электронно-волнового взаимодействия. Основное внимание уделено рассмотрению выходных резонансных характеристик системы для относительно мощных входных сигналов.

## I. Введение

Моделирование нелинейных процессов энергообмена в электронно-волновых системах (автономных и неавтономных) базируется на закономерностях фазировки заряженных частиц в высокочастотных полях значительной амплитуды. В таких условиях происходит наиболее эффективное взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем. Определяющее значение в этом процессе имеют модуляционные характеристики пучка. Применение предварительного группирования электронов в усилителях и преобразователях с длительным взаимодействием позволяет в ряде случаев значительно улучшить эксплуатационные характеристики этих устройств, что обусловлено повышением качества фазировки потока заряженных частиц [1].

В данной работе исследуются нелинейные физические процессы в неавтономной электронно-волновой системе при условии группирования пучка в нерезонансном модуляторе электромагнитным полем бегущей волны значительной амплитуды.

## II. Основная часть

Рассматривается многомерная нелинейная модель самосогласованного электронно-волнового энергообмена в системе О-типа с секционированным пространством взаимодействия [2]. Входной сигнал поступает в нерезонансную волновую систему – мо-

дулятор. Выходная резонансная секция возбуждается сгруппированным в модуляторе электронным потоком (схема на рис. 1). Таким образом, в рамках исследуемой модели необходимо учитывать два вида внешнего воздействия: силовое и параметрическое. Анализ проводится для двух режимов возбуждения выходной резонансной секции – мягкого и жесткого. Параметры нерезонансной модулирующей секции считаются фиксированными. Приведенные в работе результаты получены при условии достаточно сильной фокусировки электронного потока, когда траектории частиц можно заменить траекториями их ведущих центров.

Для исследования характеристик гибридной системы используется нелинейная многомерная теория, построенная с применением пространственно-временной аналогии между физическими процессами в волновых и колебательных системах [3]. Использование такого подхода позволяет записать уравнение возбуждения в виде:

$$\frac{d\hat{F}}{dx} + (d + i\Delta - GS)\hat{F} = A_{ext},$$

где  $\hat{F} = F \exp(-i\gamma)$ ;  $F$  и  $\gamma$  - амплитуда и фаза колебаний;  $x$  - обобщенная переменная, которая в зависимости от характера взаимодействия представляет собой или время или продольную координату;  $d$  - параметр затухания;  $\Delta$  в нерезонансной секции имеет смысл расстройки скоростей электронов и замедленной волны, в резонансной – нормированной расстройки между собственной частотой рабочей моды резонатора и частотой сигнала ( $\Delta\omega$ );  $G$  - параметр эффективности взаимодействия, определяемый для каждого участка системы на основе электродинамических характеристик;  $S$  - комплексная крутизна колебательной характеристики, которую в

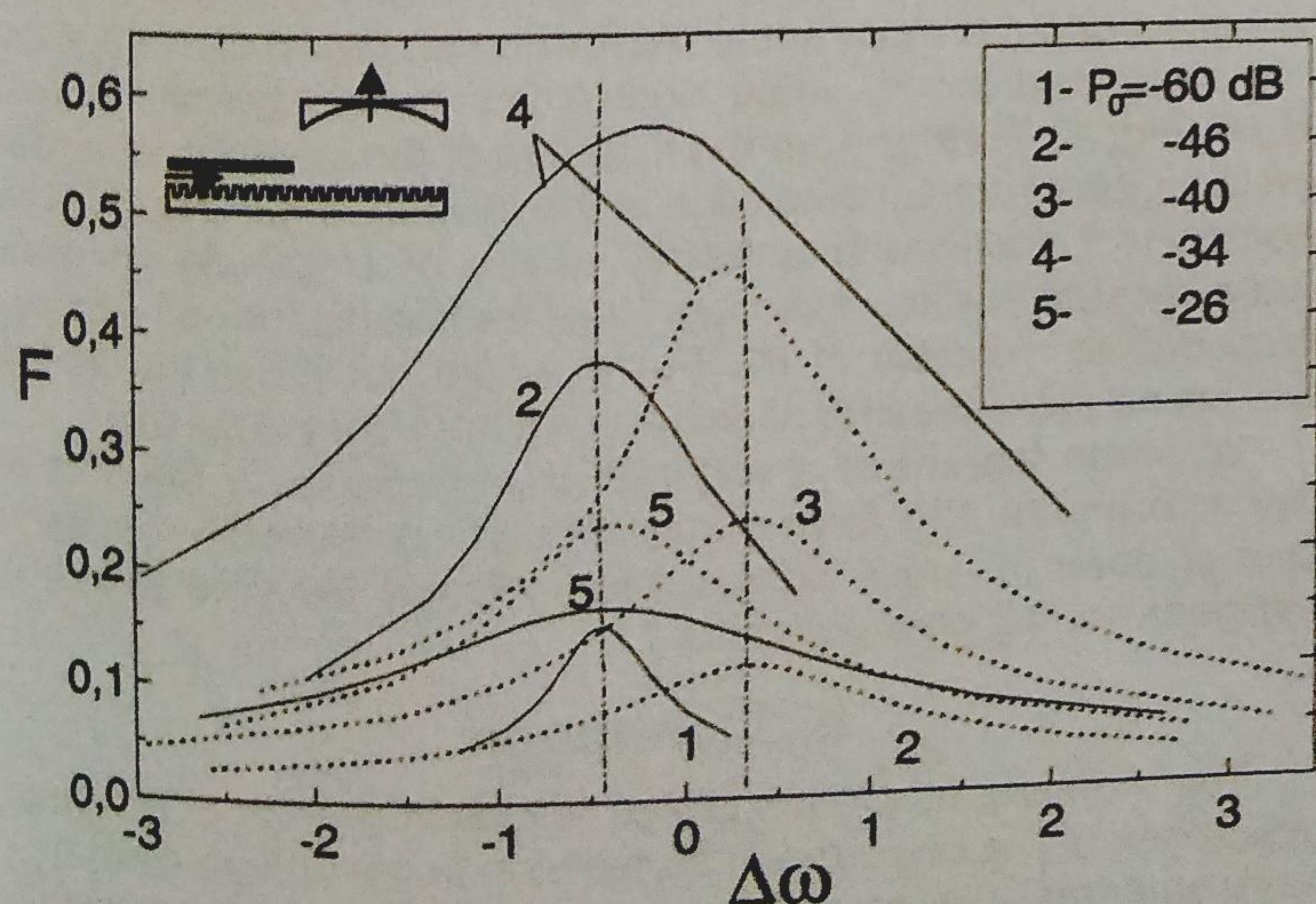


Рис.1 Резонансные характеристики в режиме регенеративного усиления

Fig.1. Amplitude response for regenerative amplification mode

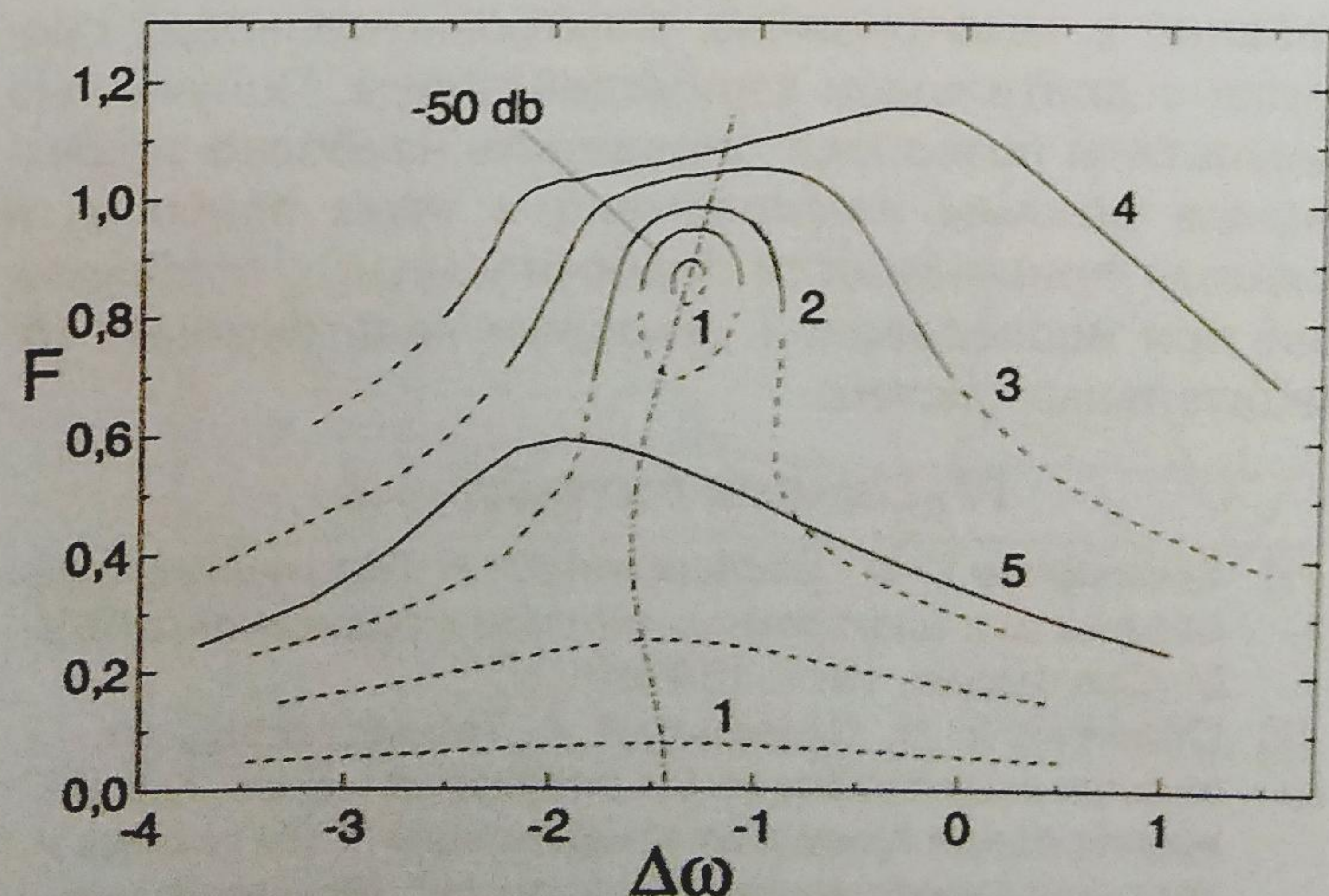


Рис.1 Резонансные характеристики в режиме принудительной синхронизации

Fig.1. Amplitude response for locking mode

# FORCED OSCILLATIONS IN NONLINEAR ELECTRON-WAVE SYSTEMS OF O-TYPE. SIMULATION AND ANALYSIS

Odarenko E. N., Shmat'ko A. A.

Kharkov National University,

Svobody Sq.4, Kharkov - 61077, Ukraine

phone: (0572) 457424

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

нерезонансной секции можно определить как погонную или дифференциальную крутизну;  $A_{ext}$  характеризует внешнее силовое воздействие.

На рис. 1 и 2 представлены резонансные характеристики выходного каскада исследуемой системы для различных значений мощности входного сигнала  $P_0$ . Графики на рис. 1 соответствуют режиму регенеративного усиления, на рис. 2 – режиму синхронизации. Сплошными кривыми обозначены устойчивые значения стационарной амплитуды колебаний для мягкого режима возбуждения, штриховыми – неустойчивые. Пунктирными кривыми на рис.1 показаны резонансные характеристики для жесткого режима возбуждения колебаний. Штрихпунктиром обозначены скелетные кривые, соответствующие автономной колебательной системе выходной секции.

В режиме регенеративного усиления взаимодействие с мощными входными сигналами приводит к изменению избирательности системы в зависимости от режима возбуждения. Следует отметить, что в жестком режиме возбуждения наиболее острый пик резонансной характеристики реализуется для значения  $P_0$ , соответствующего максимальной выходной мощности (рис.1). Кроме того, увеличение мощности входного сигнала приводит к существенному расширению полосы синхронизации (рис. 2). Распределение устойчивых и неустойчивых значений амплитуды на резонансных характеристиках свидетельствует о трансформации условий устойчивости при увеличении  $P_0$ . Например, для  $P_0 = -26$  dB колебания синхронизированы для всех значений частотной расстройки  $\Delta\omega$ .

Общей особенностью резонансных характеристик является смещение их максимума и асимметрия относительно скелетных кривых в случае мощных входных сигналов, что свидетельствует об изменении закономерностей нелинейного энергообмена.

Таким образом, применение пучков заряженных частиц, сгруппированных мощным электромагнитным полем, для возбуждения резонансных колебательных систем обуславливает появление новых закономерностей электронно-волнового взаимодействия.

### III. Заключение

Увеличение мощности сигналов приводит к изменению общих закономерностей преобразования колебаний в неавтономных электронно-волновых системах с длительным взаимодействием. Полученные результаты позволяют определять наиболее эффективные режимы энергообмена в таких приборах и границы применимости слабосигнальных приближений при исследовании динамики неавтономных колебательных систем.

### IV. Список литературы

- [1] Филимонов Г. Ф., Бадлевский Ю. Н. Нелинейное взаимодействие электронных потоков и радиоволн в ЛБВ. М. Сов. радио, 1971. 184 с.
- [2] Одаренко Е. Н., Шматько А. А. Теория гибридных электронных приборов мм диапазона. - В кн. 10-я Международная Крымская конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Материалы конференции [Севастополь, 11-15 сентября 2000 г.]. Севастополь: Вебер, 2000, стр. 171-172.
- [3] Уткин Г. М. Автоколебательные системы и волновые усилители. М. Сов. радио, 1978. 272 с.

**Abstract** - The theoretical investigation of the amplification and locking processes in the multidimensional O-type electron - wave system has been carried out. The interaction space consists of stages with the resonance and nonresonance type of interaction between electron beam and rf field. The analysis is carried out within the framework of nonlinear multidimensional model of electron - wave interaction. The main attention is given to consideration of the system characteristics for powerful signals.

### I. Introduction

The simulation of nonlinear physical processes in electron - wave systems (off-line and on-line) is based on the phasing laws of charged particles in the rf fields with considerable amplitude. Under such conditions there is a most effective interaction of electron beam with the electromagnetic field. The application of the preliminary electron bunching in amplifiers and converters with prolonged interaction allows improving efficiency of these devices. It is stipulated by increase of the electron beam phasing quality [1].

In this report the nonlinear physical processes regularities in the on-line electron - wave system under condition of the beam bunching in the modulator by an electromagnetic field with considerable amplitude are researched.

### II. Main part

The multidimensional nonlinear model of the self-consistent electron - wave interaction in the O-type system with the partitioned interaction space is considered [2]. The input signal acts in the nonresonance wave system - modulator. The output resonance section excites by bunched electron beam. Thus, within the framework of researched model it is necessary to take into account two kinds of external effect: power and parametric. The analysis carries out for two modes of the output resonance section excitation - soft and hard.

The nonlinear multidimensional theory developed with application of time-space analogy between physical processes in wave and oscillating systems is used for characteristics analysis of the hybrid system [3].

In the mode of a regenerative amplification the interaction with powerful input signals results in change of the system selectivity depending on the excitation mode. It should be noted that in the hard mode the most acute peak of a resonance characteristic is implemented for  $P_0$  value appropriate to a maximum output power (Fig. 1). Furthermore the increase of the input signal power results in the essential extension of the locking range (Fig. 2). The allocation of stable and unstable values of amplitude on resonance characteristics indicates the transformation of stability conditions at increase of  $P_0$ . For example, for  $P_0 = -26$  dB the oscillations are locked for all values of a frequency detuning.

Common feature of resonance characteristics is the shift of their maximums and asymmetry concerning "skeletal" curves in case of powerful input signals, that indicates the change of the nonlinear interaction regularities.

### III. Conclusion

The increase of signals power results in change of common regularities of the oscillations conversion in the on-line electron - wave systems with prolonged interaction. The obtained results allow determining the most effective interaction modes in such devices and applicability boundary of the different approximations at research of the on-line oscillation systems dynamics.