

УДК 621.385.633

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛОВО-ГЕНЕРАТОРЕ

*Б. П. Безручко, С. П. Кузнецов*

Экспериментально исследовался процесс установления колебаний в генераторе обратной волны типа *O*. Оказалось, что характер процесса качественно соответствует развитой ранее нелинейной теории. В непрерывном режиме генерации при достаточном превышении током пучка пускового значения наблюдалась модуляция выходного сигнала, предсказанная теоретически. Величина тока, отвечающая началу модуляции, и ее частота удовлетворительно согласуются с теорией.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] была предложена нелинейная теория переходных процессов в релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) типа *O*, основанная на методе медленно меняющихся амплитуд, построенная без учета влияния пространственного заряда, разброса скоростей электронов, распределенного затухания в волноводе и отражений на его концах. Для частного случая ЛОВ с малым КПД выведенные уравнения с точностью до нормировки совпали с соответствующими уравнениями нерелятивистской ЛОВ с малым параметром Пирса [2] ( $C \ll 1$ ).

Численное решение этих уравнений [1] показало, что переходный процесс заканчивается установлением стационарного состояния только при отношении рабочего электронного тока к пусковому  $I/I_{\text{п}} < 3,25$ , причем приближение амплитуды к стационарному уровню носит характер затухающих колебаний. Если же

$$I > I_{\text{м}} = 3,25 I_{\text{п}}, \quad (1)$$

возникает более сложный автоколебательный режим (автомодуляция), в котором выходной сигнал модулирован по амплитуде и фазе. Исходя из данных, полученных на ЭВМ, было найдено, что при токах, близких к  $I_{\text{м}}$ , безразмерный период модуляции  $T(L/v_0 + L/v_{\text{гр}})^{-1}$  равен 1,5, т. е. модуляция имеет частоту

$$f_{\text{м}} = T^{-1} = 0,67 \frac{v_0}{L} \left( 1 + \frac{v_0}{v_{\text{гр}}} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $L$  — длина лампы,  $v_0$  — скорость пучка,  $v_{\text{гр}}$  — абсолютная величина групповой скорости волны. Аналогичные результаты были получены при моделировании переходных процессов в ультрарелятивистской ЛОВ с большим КПД; в этом случае автомодуляция возникала при меньших значениях  $I/I_{\text{п}}$ .

Поскольку результаты [1] не имеют аналога в стационарной нелинейной теории ЛОВ [3], представляет интерес их экспериментальная проверка, которую, очевидно, проще всего осуществить на нерелятивистской ЛОВ. В известной нам литературе, однако, отсутствуют экспе-

риментальные данные, которые можно было бы непосредственно сопоставить с [1]\*.

Исследование нестационарных явлений проводилось на лабораторном макете ЛОВ типа *O* с замедляющей системой встречно-штыревого типа и с магнитной фокусировкой пучка. Геометрическая длина пространства взаимодействия  $L = 5$  см, площадь поперечного сечения пучка  $S \approx 2$  см<sup>2</sup>. Основные электрические параметры макета ясны из рис. 1.

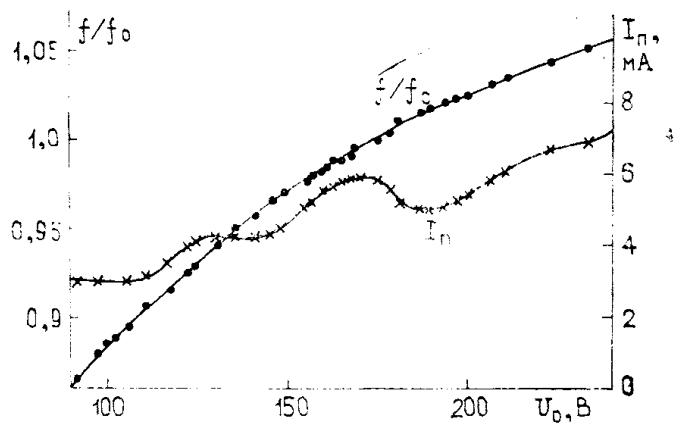


Рис. 1. Зависимость пускового тока и частоты начала генерации исследуемой лампы от ускоряющего напряжения.

Используя характеристику перестройки, можно приближенно найти величины, входящие в (2). Положим  $v_0 \approx v_\phi$  ( $v_\phi$  — фазовая скорость волны). Тогда из формулы

$$v_0 = 5,9 \cdot 10^7 \sqrt{U_0(B)}, \text{ см/с} \quad (3)$$

и из определения групповой скорости следует соотношение

$$1 + \frac{v_0}{v_{гр}} = \frac{1}{2} \frac{d(\lg U_0)}{d(\lg f)}. \quad (4)$$

На основании (4) величина  $(1 + v_0/v_{гр})^{-1}$  находилась путем графического дифференцирования зависимости  $\lg f$  от  $\lg U_0$  с шагом 0,1.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Постоянные напряжения на электроды лампы подавались от стандартных источников питания. При работе в импульсном режиме на первый анод подавались отпирающие импульсы напряжения (рис. 3а) от импульсного генератора. Длительность переднего фронта импульса составляла 30—50 нс, что заметно меньше продолжительности линейной стадии установления колебаний. Тем же генератором осуществлялся запуск ждущей развертки скоростного осциллографа, на вход «у» которого непосредственно подавался выходной сигнал ЛОВ. В непре-

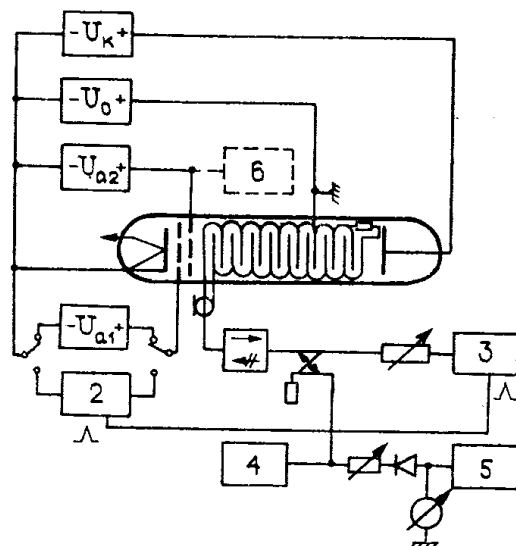


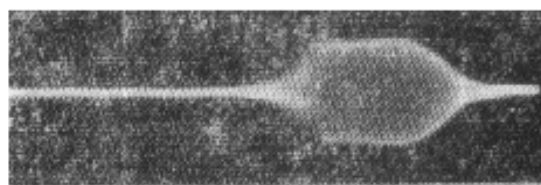
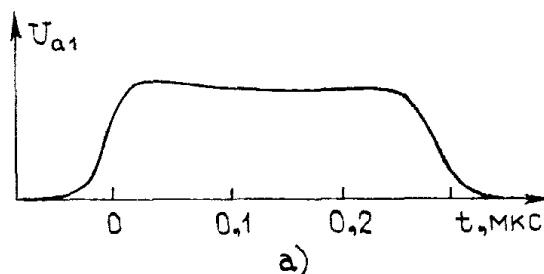
Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — исследуемая лампа, 2 — импульсный генератор, 3 — скоростной осциллятор, 4 — СВЧ-анализатор спектра, 5 — НЧ-анализатор спектра, 6 — ГСС.

\* В работе [4], например, приводится и сравнивается с линейной теорией только полная длительность переходного процесса при  $I/I_n \leq 2,4$ .

рывном режиме одновременно с наблюдением временной картины на экране осциллографа изучался СВЧ-спектр сигнала и спектр амплитудной модуляции (по схеме прямого детектирования с использованием низкочастотного анализатора спектра).

Рис. 3. Форма отпирающего импульса, подаваемого на первый анод лампы (а), и осциллограмма огибающей выходного сигнала ЛОВ при установлении колебаний от шумов (б);  $U_0=150$  В,  $I/I_{II} \approx 2$ .



б)

## 2. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЛОВО-ГЕНЕРАТОРЕ (ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ)

В импульсном режиме на экране осциллографа наблюдалась огибающая выходного сигнала ЛОВ в процессе установления колебаний (рис. 3б). Процесс имел явно выраженный флуктуационный характер (начальный участок импульса выходного сигнала лампы заметно размыт). Непосредственно из фотографии можно определить величину инкремента колебаний  $\alpha \sim 0,05$  нс<sup>-1</sup> (для этого удобнее использовать рис. 4а, см. ниже) и длительность линейной стадии процесса  $t' \sim 180$  нс. Отсюда находим, что мощность сигнала в самом начале процесса примерно на  $8,7 \alpha t' \sim 80$  дБ меньше, чем в стационарном режиме, и соответствует по порядку величины уровню дробовых шумов, который по оценке [1] должен составлять приблизительно  $10 \lg(8\pi^2 efC/I) \sim -75$  дБ.

Чтобы получить четкую картину на экране осциллографа, от ГСС (рис. 2, пунктир) в лампу вводился достаточно слабый внешний сигнал, который служил «затравкой» для переходного процесса и не оказывал практически никакого влияния на его дальнейший ход\*.

На рис. 4 вместе с осциллограммами переходного процесса приведены аналогичные теоретические графики. При построении последних использовались зависимости амплитуды колебаний от времени, найденные в [1], которые на участке экспоненциального роста сшивались с полученными из линейной теории.

Хорошее качественное соответствие между теорией и экспериментом очевидно (рис. 4). Существенно, что одинаковым образом меняется характер процесса при изменении  $I/I_{II}$ . Период, начальный размах и декремент колебаний амплитуды около стационарного уровня примерно соответствуют расчетным. Для достаточно больших  $I/I_{II}$  одночастотный стационарный режим автоколебаний не устанавливается, а возникает

\* Рассуждая, как в начале разд. 2, можно найти, что при наличии внешнего сигнала начальный уровень колебаний в ЛОВ был на 40—50 дБ ниже стационарного и на 20—30 дБ выше уровня дробового шума.

незатухающая модуляция (в этом можно было убедиться, увеличивая длительность отпирающих импульсов), рассмотренная более подробно в следующем разделе для случая непрерывного режима.

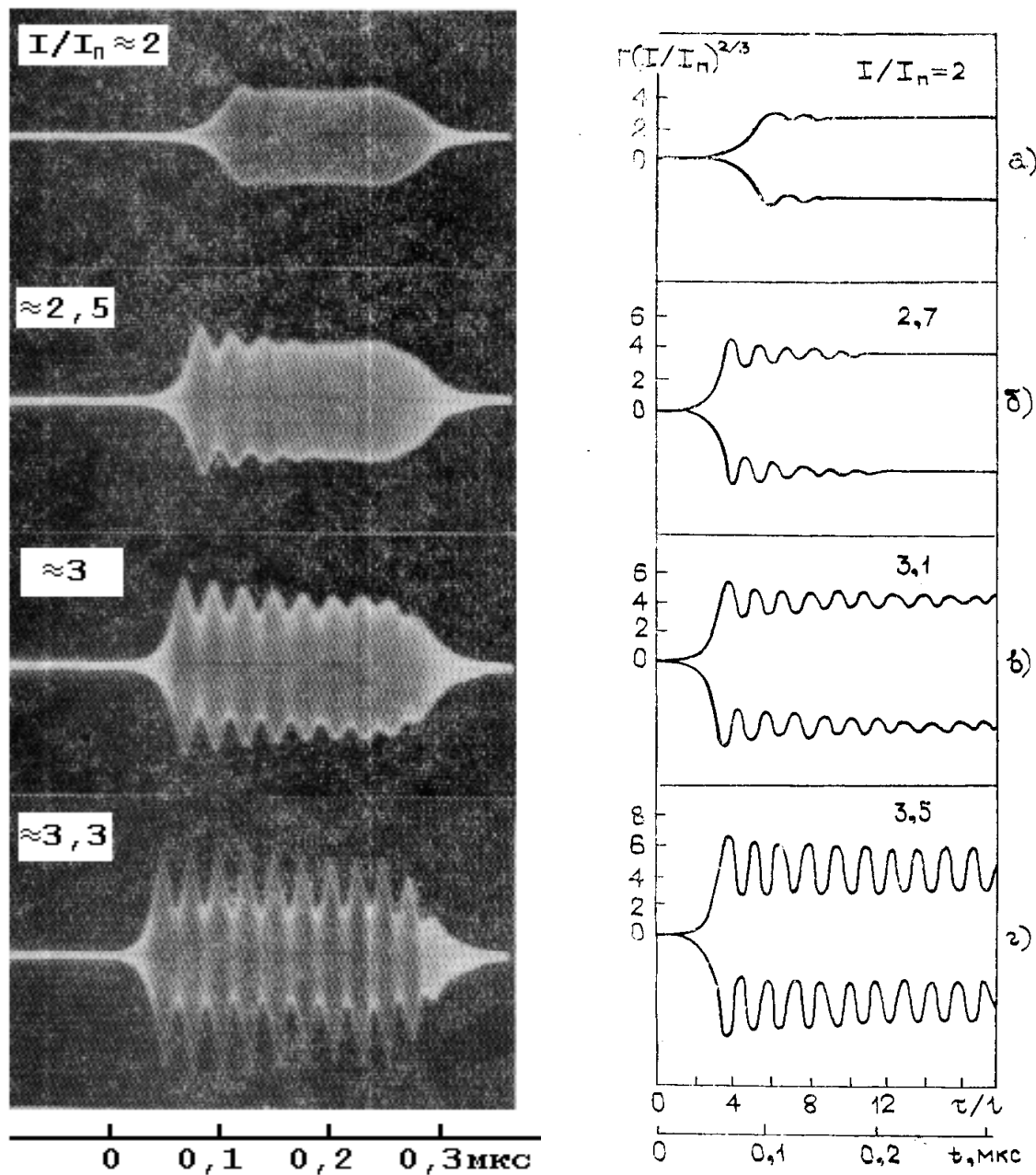


Рис. 4. Слева — осциллограммы переходного процесса в ЛОВ при установлении колебаний от вспомогательного сигнала,  $U_0 = 150 \text{ В}$ . Справа — аналогичные теоретические графики, построенные по данным [1] в предположении, что мощность сигнала в момент  $t = 0$  на  $50 \text{ дБ}$  меньше уровня, отвечающего  $F(I/I_n)^{2/3} = 1$ . Масштаб по оси ординат выбран так, чтобы совпали уровни стационарного режима на рисунке и осциллограмме а).

### 3. АВТОМОДУЛЯЦИЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ЛОВО-ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

В непрерывном режиме работы ЛОВ при превышении током пучка пускового значения возникают одночастотные колебания, амплитуда которых увеличивается с ростом тока (рис. 5а). Когда ток превышает

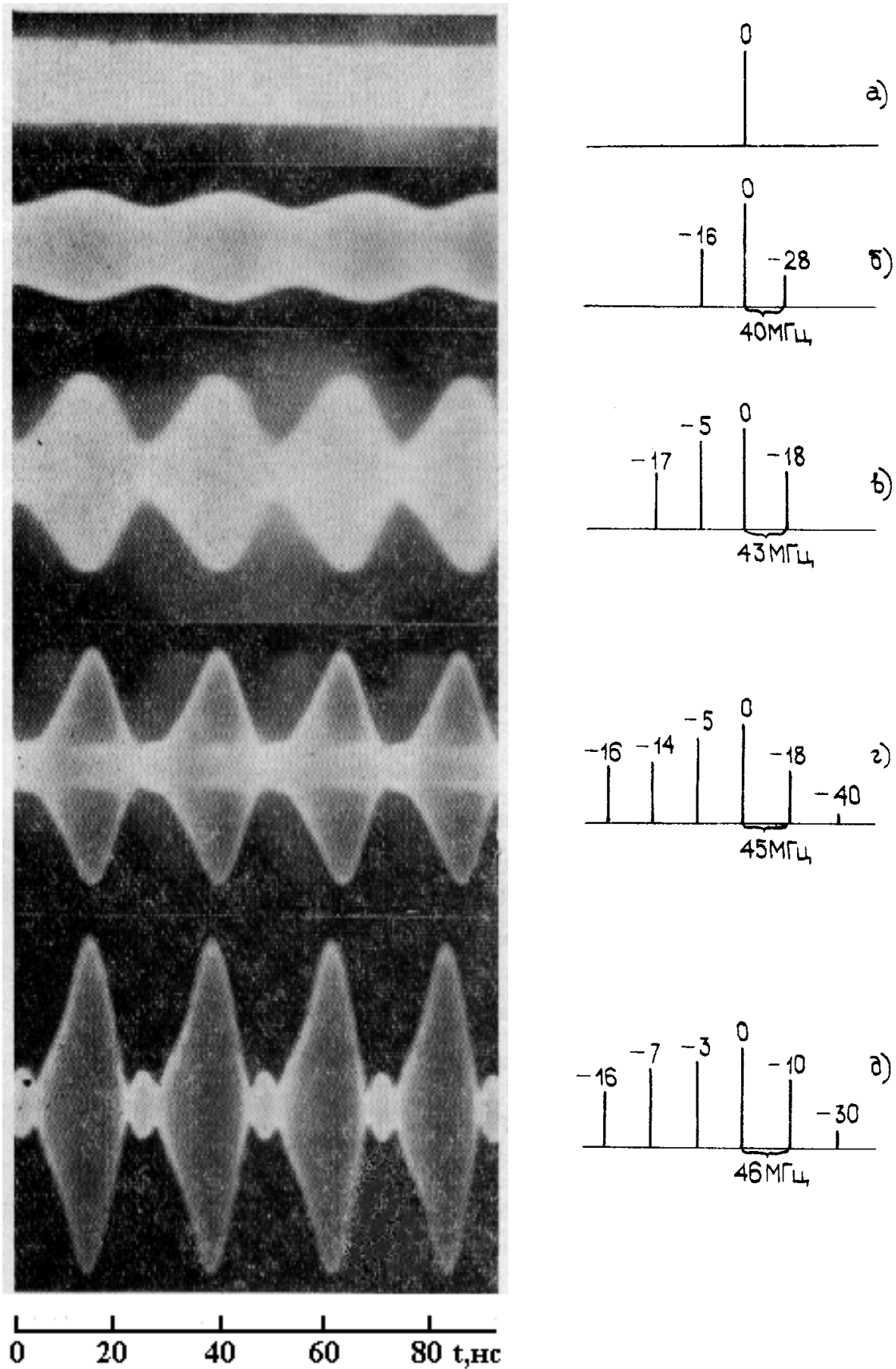


Рис. 5. Осциллограммы и СВЧ-спектры выходного сигнала ЛОВ-генератора в непрерывном режиме при  $U_0 = 100$  В,  $I/I_n = 2,5$  (а), 3,9 (б), 5,6 (в), 6,9 (г), 9,7 (д). Цифры около спектральных линий показывают их примерный уровень в децибелах относительно основной составляющей.

некоторую величину  $I_M$ , появляется автомодуляция. Форма ее вначале близка к синусоидальной, а спектр содержит, кроме основной, только две заметные боковые составляющие (рис. 5б). Затем для  $I/I_{II} \geq 5,6$  модуляция принимает вид последовательности характерных всплесков с более пологим передним и резким задним склонами (рис. 5в — д), как это и было предсказано [1] (см. теоретические графики рис. 6). Спектр сигнала при этом состоит из ряда эквидистантных составляющих, амплитуда которых убывает при удалении от основной. Отметим, что сходный характер модуляции в эксперименте и численном счете наблюдался при несколько отличных значениях  $I/I_{II}$ . Увеличение частоты модуляции с ростом тока в эксперименте выражено более явно, чем в теории.

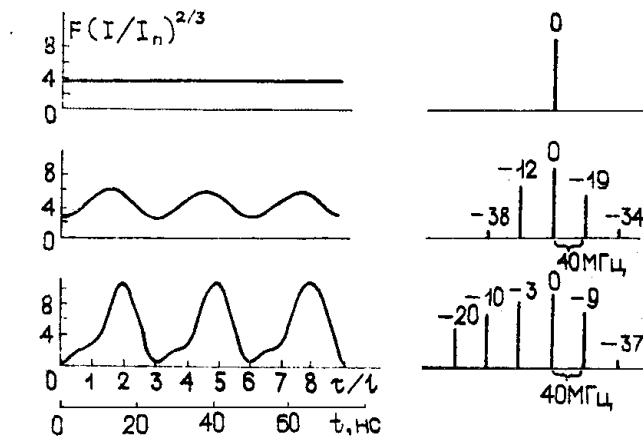


Рис. 6. Слева — теоретические зависимости амплитуды выходного сигнала ЛОВ-генератора от времени в стационарном режиме [3],  $I/I_{II}=2,5$  (а), и в режиме установившейся автомодуляции [1],  $I/I_{II}=3,5$  (б), 5,6 (в). Справа — соответствующие СВЧ-спектры, найденные путем численного фурье-анализа комплексной амплитуды сигнала. Цифры показывают уровень составляющих относительно основной в децибелах.

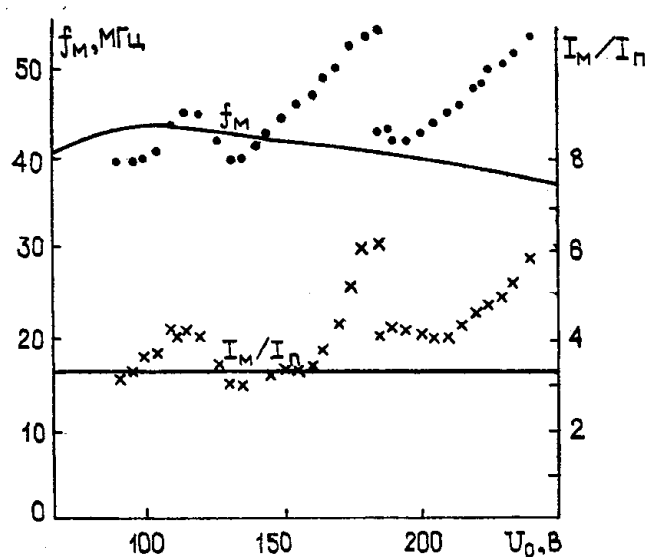


Рис. 7. Измеренные в эксперименте отношения тока к пусковому, при которых начинается автомодуляция (крестики) и ее частота (точки) в зависимости от ускоряющего напряжения. Сплошные линии — результат расчета по формулам (1) и (2).

На рис. 7 представлены результаты измерений в разных точках рабочего диапазона отношения  $I_M/I_{II}$  и частоты модуляции  $f_M$  при  $I \approx I_M$ , а также результаты расчета этих величин по формулам (1) и (2). Соответствие теоретических и экспериментальных значений  $I_M/I_{II}$  и  $f_M$  представляется удовлетворительным. Резкие выбросы экспериментальных зависимостей, по-видимому, объясняются влиянием отражений волны от концов лампы.

Проведенное сопоставление некоторых результатов теории [1] с экспериментом показывает, что основные нестационарные явления и характер их изменения в зависимости от тока пучка описываются теорией правильно. Наблюдавшиеся расхождения сводились к количественным поправкам и объясняются, очевидно, факторами, не учтенными в теории (отражения, пространственный заряд, распределенное затухание). Не исключено, однако, что более существенное влияние этих факторов может привести и к качественному изменению процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Гинзбург, С. П. Кузнецов, Т. Н. Федосеева, Изв. вузов — Радиофизика (в печати).
2. Электроника ламп с обратной волной, под ред. В. Н. Шевчика и Д. И. Трубецкова, изд. Саратовского ун-та, 1975, гл. III.
3. Г. Н. Рапопорт, ДАН СССР, 117, № 3, 411 (1957); Н. Ф. Ковалев, В. И. Петрухина, А. В. Сморгонский, Радиотехника и электроника, 20, № 7, 1574 (1975).
4. A. V. Brown, Proc. IRE, B-105, Suppl. № 10, 486 (1958).

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию  
28 февраля 1977 г.

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NONLINEAR NONSTATIONARY PROCESSES IN BWO

*B. P. Bezruchko, S. P. Kuznetsov*

The build-up oscillations in *O*-type BWO were experimentally investigated. The character of the process appeared to correspond qualitatively to the nonlinear theory developed earlier. In cw generation when the current exceeds essentially the start beam, the predicted output signal modulation is observed. The current value at the beginning of modulation and its frequency are agreed satisfactory agreement with the theoretical values.