

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЗЬНЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЛБВ

Утверждено редакционным
советом института в ка-
честве методических ука-
заний к лабораторной ра-
боте для студентов

621.396.61

Составители: Д.А. Федотов, Л.В. Макарова

В методических указаниях приведены основные теоретические сведения о характеристиках лбв типа 0. Дано описание лабораторного стенда и методики проведения исследования высокочастотных характеристик прибора.

Предназначается для студентов специальности 23.01 (0701), выполняющих лабораторные работы по курсу "Радиопередаточные устройства, электронные и квантовые приборы СВЧ".

Рецензенты:

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ

СВЕДЕНИЯ

Лампы бегущей волны (ЛБВ) – это электровакуумные приборы, в которых используется принцип непрерывного взаимодействия электронов с полем электромагнитной волны, распространяющейся по волноводной системе со скоростью электронного потока. В исследуемых в данной работе ЛБВ типа О электронный поток движется под действием электрического поля и при взаимодействии электронов с полем меняется их кинетическая энергия.

Взаимодействие электронов с полем
бегущей волны

Пусть имеется созданный каким-либо образом электронный поток, распространяющийся вдоль протяженной периодической электромагнитной структуры, рассматриваемой замедляющей системой, поскольку фазовая скорость СВЧ волны в ней v_{φ} существенно меньше скорости света. Осуществить двустороннее взаимодействие электронов с электромагнитной волной, характеризующееся передачей энергии только от СВЧ поля к электронам или только от электронов полю, можно лишь при близости скоростей электронов v_e и волны v_{φ} . Возможны 3 варианта: а) $v_e = v_{\varphi}$; б) $v_e < v_{\varphi}$; в) $v_e > v_{\varphi}$. Качественно описать каждый вариант помогут диаграммы относительного смещения электронов от времени в системе координат, перемещающейся со скоростью v_{φ} по направлению движения электронов (рис. 1). Для случая $v_e = v_{\varphi}$ группирование электронов происходит в области нулевого значения СВЧ напряжения, и взаимодействие электронов с полем в среднем не приводит к передаче энергии электронами или от них полю. На этих диаграммах (рис. 1) штрихами обозначены траектории электронов в отсутствие СВЧ поля, сплошными линиями – траектории в поле волны. Если $v_e < v_{\varphi}$ электроны группируются в зоне

ускоряющего поля, поэтому они получают дополнительную кинетическую энергию, отбирая ее от СВЧ поля. Для случая $\tau_3 > \tau_{\varphi}$ центр сгустка электронов находится в тормозящем СВЧ поле, благодаря чему энергия передается от электронов полю.

Для усилительных ЛБВ, работающих в режиме, близком к линейному, математический анализ взаимодействия электронов с СВЧ полем обычно проводится на основе линеаризованной модели лампы бегущей волны. При этом полагается, что скорость электронов существенно меньше скорости света, электрическое поле одинаково по всему сечению электронного потока и движение зарядов происходит только вдоль замедляющей системы (ЗС). ЗС представим в виде эквивалентной длинной линии с погонными сопротивлениями X и проводимостью Y (рис.2). Конвекционному току электронного луча i соответствует ток смещения в линии $y = -di/dz$ и ток проводимости в линии I . В линеаризованной модели все эти величины изменяются по гармоническому закону, т.е. по закону $\exp(j\omega t - \Gamma z)$, где Γ - постоянная распространения с учетом взаимодействия поля с электронами. Тогда уравнения, связывающие токи и напряжения в линии:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial z} = y - jYU \\ \frac{\partial U}{\partial z} = -jXI \end{cases} \quad (1)$$

- можно преобразовать к виду

$$\begin{cases} \Gamma I = jYU - \Gamma_0 I \\ \Gamma U = jXI \end{cases} \quad (2)$$

Из (2) получим формулу для напряжения

$$U = j \frac{XI \Gamma_0}{\Gamma_0^2 - \Gamma^2} = \frac{\Gamma_0 Z_0}{\Gamma_0^2 - \Gamma^2} i \quad (3)$$

где $\Gamma_0 = j\sqrt{XY}$ - постоянная распространения волны в ЭС без учета взаимодействия с электронами;

$\bar{v}_0 = (X/Y)^{1/2}$ - волновое сопротивление ЭС.

Формула (3) связывает находящееся в ЭС СВЧ напряжение с приводящим его конвекционным током. С другой стороны, это СВЧ поле обуславливает группирование электронов. Скорость электрона в поле $v = v_0 + v_n$, где v_0 - скорость без учета взаимодействия СВЧ поля,

v_n - переменная составляющая скорости:

$$v_n = v_{1n} \exp(-\Gamma z + j\omega t) \ll v_0$$

Изменение напряженности электрического поля вдоль ЭС приводит к изменению скорости электронов. Опуская промежуточные выкладки запишем для переменной составляющей скорости электронов:

$$v_n = \frac{\Gamma U}{2v_0(\Gamma - j\beta_3)} \cdot v_0, \quad (4)$$

где v_0 - напряженность постоянного электрического поля, под действием которого электроны приобрели скорость

$\beta_3 = \frac{\omega}{v_0}$ - так называемая фазовая постоянная электронного потока (по аналогии с фазовой постоянной электромагнитной волны).

Из уравнения непрерывности для плотности пространственного заряда с учетом (4) получим выражение для переменной составляющей конвекционного тока

$$i_n = j \frac{\Gamma \beta_3 U I_0}{2v_0(\Gamma - j\beta_3)^2}, \quad (5)$$

где I_0 - постоянная составляющая конвекционного тока.

Итак, формула (3) связывает переменное напряжение на ЭС с вызвавшим его переменным конвекционным током, а (5) показывает величину этого конвекционного тока при группировании электронов воздействием переменного поля. Поскольку эти формулы взаимосвязаны, то подставим (3) в (5):

$$2U_0 (\Gamma - j\beta_3)^2 = j I_0 \beta_3 \frac{\Gamma^2 \Gamma_0 \approx 1}{\Gamma_0^2 - 1} \quad (6)$$

Фазовая скорость волны и изменение амплитуды волны с расстоянием зависит от Γ . (6) описывает уравнение четвертой степени относительно Γ . Следовательно, распространяется 4 ЭС, в общем случае, 4 волны. Поскольку $\beta_n \ll \beta_0$, то и Γ отличается от Γ_0 лишь на некоторую малую величину. В этом случае решения уравнения (6) таковы:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= j\beta_3 (1 + C/2) + \sqrt{3}/2 \beta_3 C, \\ \Gamma_2 &= j\beta_3 (1 + C/2) - \sqrt{3}/2 \beta_3 C, \\ \Gamma_3 &= j\beta_3 (1 - C) \\ \Gamma_4 &= -j\beta_3 (1 - \frac{C^3}{4}) \approx -j\beta_3 = \Gamma_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $C = (z_0 I_0 / 4 U_0)^{1/3}$ - параметр, характеризующий ЭС и режим работы ЛЭВ.

Первое решение уравнения, т.е. величина Γ_1 , описывает волну со скоростью меньшей скорости электронов и затухающей вдоль ЭС амплитудой; второе решение - волну с той же скоростью, но нарастающей амплитудой. Третья волна, описываемая Γ_3 , имеет неизменную вдоль ЭС амплитуду, а четвертая волна - обратная, т.к. распространяется навстречу электронному потоку, и как видно из (7), не взаимодействует с этим потоком. Для режима усиления интерес представляет только второе решение. Если длина ЭС равна L , то амплитуда волны на выходе больше входной в $\exp[\operatorname{Re}(-\Gamma_2 L)]$ раз, т.е. в $\exp(\frac{\sqrt{3}}{2} \beta_3 C L)$. Вдоль ЭС укладывается $N = L/\lambda_B$ волн. Учитывая, что энергия входной СВЧ волны делится между тремя прямыми волнами, запишем для коэффициента усиления следующее выражение (в децибелах):

$$G = 20 \lg \frac{1}{3} \exp(\sqrt{3} \pi CN) \approx 47,3 CN - 9,54$$

На рис.3 приведены теоретическая (сплошная линия) и экспериментальная (пунктир) зависимости коэффициента усиления от длины ЗС.

Замедляющие системы

Замедление фазовой скорости электромагнитной волны осуществляется или заполнением области распространения материалом с большой диэлектрической или магнитной проницаемостью или введением неоднородностей: штырей, диафрагм и т.п.

Спиральная линия с малым шагом или заполненная диэлектриком относится к однородным ЗС. Волноводы с диафрагмами, ребристыми стенками и т.п. - к неоднородным ЗС. В первых - однородных - продольная составляющая электрического поля

$$E(z, t) = \operatorname{Re} [E_m \exp(j\omega t - j\beta_0 z)]$$

В неоднородных ЗС амплитуда напряженности поля E_m периодически повторяется: $E_m(z) = E_m(z + h)$

Периодическую зависимость поля от координаты можно представить в виде суммы волн с постоянной амплитудой, не зависящей от координаты.

Такие волны называются пространственными гармониками. Разложение в ряд Фурье периодической зависимости даст:

$$E_m(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} E_{m_k} \exp(-j 2\pi \frac{z}{h} k),$$

где E_{m_k} - амплитуда пространственной гармоники с номером k .

Тогда

$$\begin{aligned} E(z, t) &= \operatorname{Re} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-j 2\pi \frac{z}{h} k) \exp(j\omega t - j\beta_0 z) = \\ &= \operatorname{Re} \sum_{k=-\infty}^{\infty} E_{m_k} \exp[j(\omega t - \beta_k z)], \end{aligned}$$

где $\beta_k = \beta_0 + 2\pi \frac{k}{h}$ - фазовая постоянная k -ой пространственной гармоники.

Поскольку фазовая скорость связана с фазовой постоянной - $v_{\varphi} = \frac{\omega}{\beta}$, то имеем, что в ЗС распространяется набор волн со скоростями

$$v_{\varphi k} = \frac{\omega}{\beta_k} = \frac{v_{\varphi 0}}{1 + 2\pi k / \beta_0 h}$$

Поскольку все пространственные гармоники имеют одну и ту же частоту ω и характеризуют единый процесс переноса энергии электромагнитной волны с одной групповой скоростью, то электронам достаточно взаимодействовать с какой-либо одной из них. Поэтому при больших положительных K можем получить низкие значения $v_{\varphi k}$, т.е. уменьшить и скорость электронов, снижая ускоряющие напряжения, и увеличить размеры ЗС, что особенно важно для ЛВВ миллиметрового диапазона с точки зрения улучшения теплоотвода и повышения технологичности прибора.

При отрицательных значениях $v_{\varphi k}$ (для $K < -\beta_0 \frac{h}{2\pi}$) ЛВВ превращается в лампу обратной волны - ЛОВ.

Важной характеристикой ЗС является ее дисперсная характеристика, т.е. зависимость $v_{\varphi k}$ от ω . ЗС могут быть с сильной и слабой дисперсией, как положительной, так и отрицательной. Дисперсная характеристика зависит от типа ЗС и номера пространственной гармоники. Для слабой дисперсии (рис.4, а) условие синхронизма

$v_z \approx v_{\varphi k}$ может быть выполнено в широкой полосе частот, благодаря чему можно реализовать усиление в ЛВВ с полосой рабочих частот до 20...50% и даже больше. При сильной дисперсии (рис.4, б) полоса значительно уже, но центральную частоту можно сдвигать изменением

v_z , т.е. ускоряющего напряжения. На рис.5 представлены наиболее распространенные типы ЗС: а) однозаходная спираль, б) диафрагмированный волновод (круглый), в) "гребенка", г) "встречные стержни".

В усилительных ЛБВ и генераторных малой мощности применяют спиральные ЭС, поскольку коэффициент замедления в них высок., а дисперсия мала. Недостаток спиральных ЭС - в малой рассеиваемой мощности. ЭС типа "гребенки", "встречных штырей" и им подобные обеспечивают лучшая теплоотвод и могут применяться в более мощных генераторах.

Конструкция ЛБВ типа О

Схематичное изображение ЛБВ типа О приведено на рис.6. Электронная пушка, которая создает направленный электронный поток, состоит из катода 1 и электростатической фокусирующей системы 2, включающей в себя обычно один или несколько анодов. Дополнительная фокусировка луча осуществляется магнитной фокусирующей системой 3 в виде соленоида или, для малых по габаритам ламп, постоянных магнитов. Существуют ЛБВ, в которых ЭС состоит из двухзаходной спирали, на каждой из заходов которой подано свое постоянное напряжение. За счет разности этих напряжений в ЭС образуется система электростатических линз. Фокусировка луча этими линзами настолько высока, что на коллектор (4 на рис.6), собирающий "отрабанные" электроны, падает до 97% электронов, пролетевших анод. СВЧ сигнал подается на вход 5 и снимается с выходного 6 устройства. Взаимодействие СВЧ поля с электронным потоком происходит в пространстве вдоль ЭС 7.

В ЛБВ часто применяют поглащающие вставки, клинья для поглащения нерабочих волн. Это необходимо сделать, т.к. СВЧ тракт внутри и вне лампы не бывает идеально согласован, и существует опасность самовозбуждения лампы на нерабочих гармониках.

Характеристики ЛБВ

Коэффициент усиления ЛБВ определили выше. Оценим теперь максимальный КЦ. Ранее было получено, что для усиливаемой СВЧ волны постоянная распространения равна $\Gamma = j\beta_2(1 + 0,5C) - \frac{\sqrt{3}}{2}\beta_2 C$. Значит, фазовая скорость волны равна $v_{\varphi} = \frac{v_2}{1 + 0,5C}$. При типичных

значениях параметра $C=0,02\dots 0,3$ начальная скорость электронов v_0 на 1...15% больше v_{ϕ} . Отдавая кинетическую энергию волне, электроны замедляются. Тогда, максимальная энергия, переданная СВЧ полю равняется $\frac{m v_0^2}{2} - \frac{m v_{\phi}^2}{2}$. Максимальный КПД при этом $\eta_{\max} = \frac{(\frac{m v_0^2}{2} - \frac{m v_{\phi}^2}{2}) / \frac{m v_{\phi}^2}{2}}{1}$ или, после упрощения, $\eta_{\max} = C \cdot \frac{1}{4} \cdot C$, т.е. по предельности КПД.

Для увеличения КПД можно на коллектор подать напряжение питания меньше, чем на ЭС. Второй вариант: ЭС делят на секции и подают на каждую секцию свое постоянное напряжение, повышающееся к коллектору. Этим компенсируется замедление электронов.

ЛБВ характеризуется, как и любой другой усилитель, амплитудной, амплитудно-частотной и фазовой характеристиками. Амплитудную характеристику определяют как зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ или коэффициента усиления по мощности K_p от входной мощности $P_{\text{вх}}$ на фиксированной частоте и согласованной нагрузке. Как видно из графика на рис.7, на зависимости $P_{\text{вых}} = F(P_{\text{вх}})$ есть линейный участок, который при больших $P_{\text{вх}}$ переходит в участок насыщения. Это объясняется тем, что увеличение входного сигнала приводит к увеличению параметра группирования, при этом увеличивается амплитуда переменной составляющей конвекционного тока. Но при параметре группирования больше оптимального уровень первой гармоники тока луча не увеличивается, а затем даже снижается. Максимальное значение коэффициента усиления ограничивается также специально вводимым в лампу поглотителем, препятствующим самовозбуждению.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) определяет значение $P_{\text{вых}}$ или K_p в полосе частот при постоянной $P_{\text{вх}}$, выбираемой на линейном участке амплитудной характеристики. Хотя АЧХ снимается в режиме согласования ЛБВ с нагрузкой, характеристика получается обычно неравномерной в рабочей полосе частот

(рис 8), т.к. с изменением частоты изменяется степень согласования волны с ЗС, изменяются уровень и фазовые соотношения высших гармоник. Значительное влияние на неравномерность АЧХ оказывает дисперсия ЗС. В специальных широкополосных ЛЭВ полоса рабочих частот достигает нескольких октав.

Фазовыми характеристиками называют зависимости набега фазы волны в ЛЭВ от различных факторов режима работы: от частоты, от напряжений на электродах, от тока луча, от сопротивления нагрузки и т.п. На рис.9 приведен пример зависимости изменения фазового набега $\varphi_{\text{вых}}$ от изменения ускоряющего напряжения $\frac{\Delta U_0}{U_0}$. В то же время полный набег фазы для данной ЛЭВ в номинальном режиме составляет $8370^\circ \dots 8400^\circ$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает в себя специализированный блок питания с пристыкованной к нему пакетированной ЛБВ типа УВ-45, генератор сигналов Г4-32А, универсальный цифровой вольтметр В7-16А и измеритель мощности МЗ-10А. В качестве измерителя мощности может быть использована детекторная головка с измерителем постоянного выходного напряжения.

Блок питания ЛБВ подключается к сети 115В 400 Гц, остальные приборы - к сети 220В 50 Гц. В блоке питания ЛБВ имеется 2 тумблера, позволяющих отдельно включать накальные и высоковольтные цепи лампы. Необходимо помнить, что высокое напряжение должно включаться не ранее, чем через 3...5 минут после подачи накального напряжения. При подаче питания на ЛБВ одновременно загораются соответствующие индикаторные лампочки. На передней панели блок питания имеет ручки потенциометров, регулирующих ускоряющее анодное напряжение "РЕГ.ЭОК." (регулировка напряжения на фокусирующем аноде) и "РЕГ.СПИР" (регулировка напряжения на спиральной ЗС). Контролировать эти напряжения можно вольтметром, подключаемым к соответствующим гнездам на передней панели блока питания.

Частота и мощность СВЧ сигнала, подаваемого на ЛБВ, устанавливаются ручками регулировки генератора сигнала Г4-32А согласно с инструкцией по его эксплуатации.

Измеритель мощности подключается непосредственно к выходному фланцу ЛБВ.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с установкой и измерительной аппаратурой, используемой в работе.
2. Прогреть и откалибровать измерительные приборы.

3. Включить блок питания ЛБВ в следующей последовательности:
 - а) включить накал и прогреть 3...5 минут;
 - б) потенциометры "ГД.ДОК." и "РЕГ.СПИР." поставить в среднее положение;
 - в) включить высокое напряжение.
4. Установить напряжение на фокусирующем аноде 100В.
5. Снять амплитудную характеристику ЛБВ для чего:
 - а) установить частоту генератора Г4-32А равной 9800 МГц и мощность на его выходе 5,0 мкВт;
 - б) потенциометром "РЕГ.СПИР." добиться оптимального напряжения на ЗС, при котором входная мощность максимальна, записать значение $U_{спир. опт}$;
 - в) увеличивая входную мощность ЛБВ с шагом 0,5...2 дБ, снять зависимость $P_{вых}$ от $P_{вх}$, включая 2...3 значения в области насыщения; результаты измерений свести в таблицу.
6. Снять амплитудно-частотную характеристику ЛБВ, для чего:
 - а) напряжение на ЗС выставить оптимальное (см. предыдущий пункт);
 - б) фокусирующее напряжение выставляется также по максимальному значению выходной мощности (записать значение напряжения);
 - в) установить $P_{вх}$, соответствующую примерно середине линейного участка амплитудной характеристики, снять АЧХ, изменяя частоту сигнала в пределах 9,3...10,3 ГГц через 100 МГц; результаты свести в таблицу.
7. Снять регулировочные характеристики ЛБВ, для чего:
 - а) установить частоту сигнала 9,8 ГГц, мощность на входе ЛБВ 5 мкВт;
 - б) установить фокусирующее напряжение 100 В;

- в) изменяя напряжение на ЭС ("РЕГ.СПИР."), считать зависимость $P_{вых}$ от $U_{спир}$ (всего не менее 5...6 точек); результаты свести в таблицу;
- г) установить $U_{спир}$, соответствующее максимальной выходной мощности, изменяя фокусирующее напряжение, считать зависимость $P_{вых}$ от $U_{фок}$ (не менее 5...6 точек); результаты свести в таблицу;
8. По экспериментальным данным построить графики. Определить по амплитудно-частотной характеристике полосу рабочих частот (по уровню - 3 дБ).
9. Оформить отчет. Содержание отчета:
- а) титульный лист (с указанием института, кафедры, лаборатории, наименованием работы, Ф.И.О. выполнявшего и проверившего отчет);
 - б) функциональная структурная схема лабораторной установки;
 - в) таблицы и графики экспериментальных данных;
 - г) выводы по проделанной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1972. - т.2.
2. Дробов С.А., Бычков С.И. Радиопередлющие устройства. - М.: Сов. радио, 1969.
3. Радиопередлющие устройства /Под ред. М.В. Благовещенского, Г.М. Уткина. - М.: Радио и связь, 1982.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Условие фазового синхронизма в ЛВВ, его физический смысл.
2. Прямые и обратные волны в ЛВВ. Их взаимодействие с электронным потоком.
3. Типы замедляющих систем, их характеристики.
4. Конструкция ЛВВ-0.

5. Амплитудная характеристика ЛБВ-0.
6. Амплитудно-частотная характеристика, ее связь с режимом работы ЛБВ.
7. Усилительные свойства ЛБВ, их связь с конструкцией лампы и режимом работы.
8. Фазовые характеристики ЛБВ.
9. Как осуществить в ЛБВ амплитудную модуляцию.
10. Импульсная модуляция в ЛБВ.
11. Угловая модуляция в ЛБВ.
12. Фокусирующие системы ЛБВ.

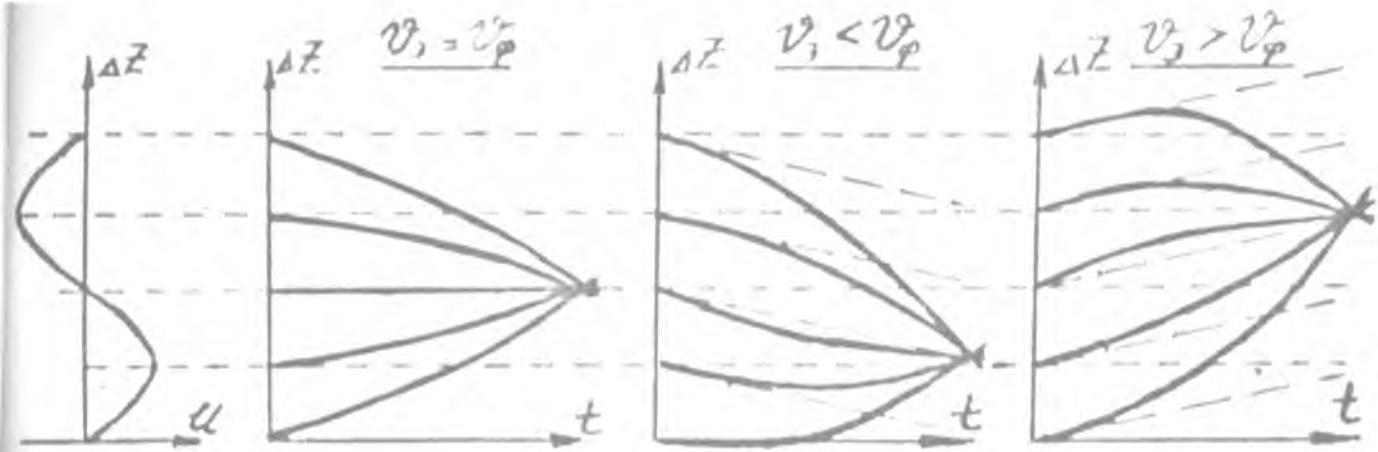


Рис. 1.

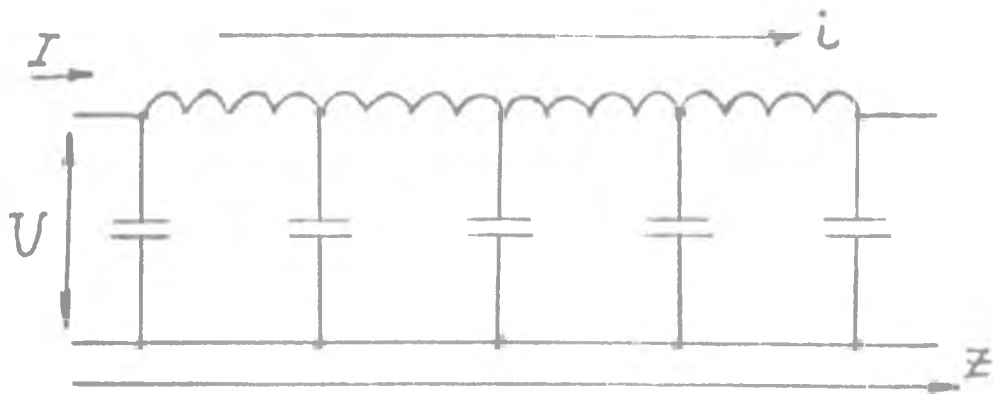


Рис. 2.

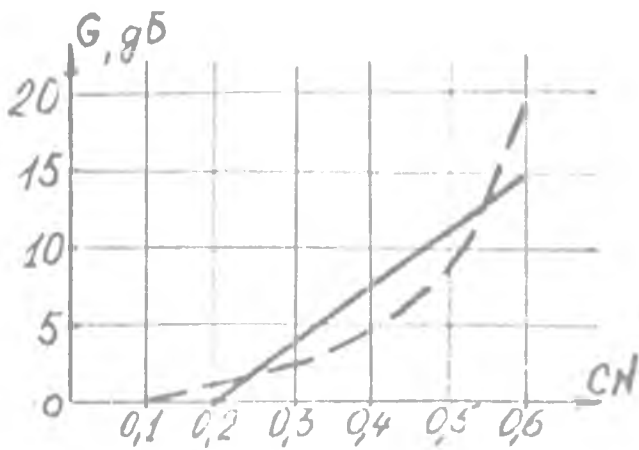


Рис. 3

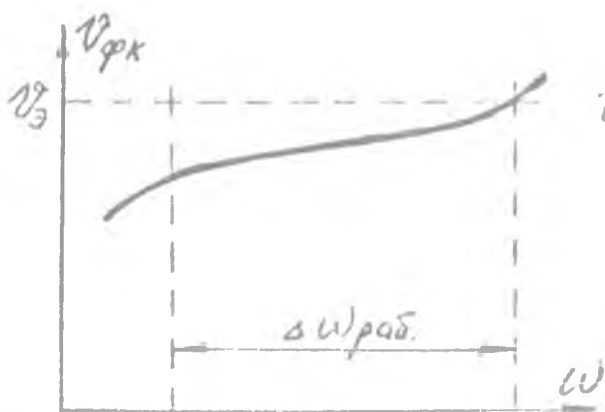


Рис. 4а

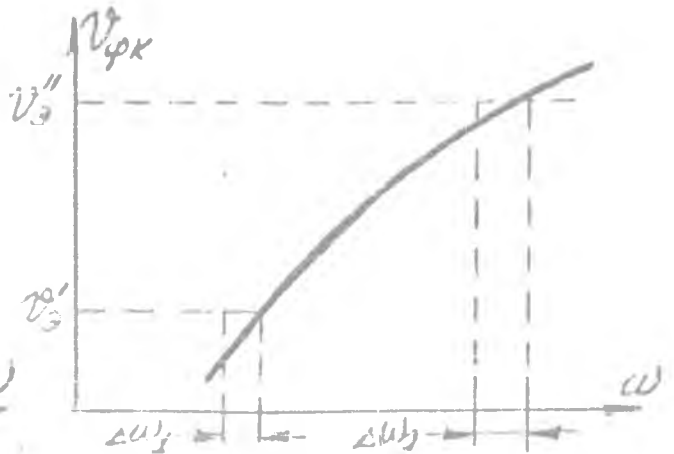


Рис. 4б.

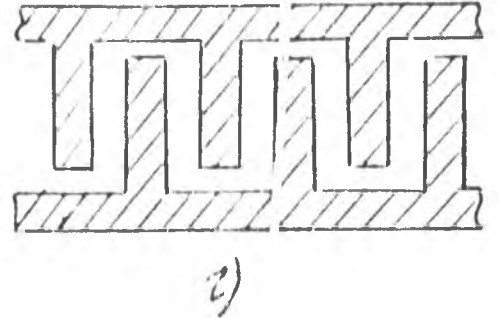
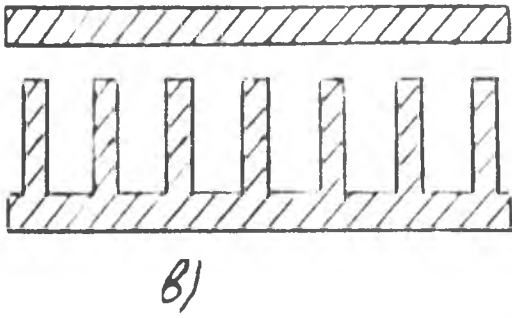
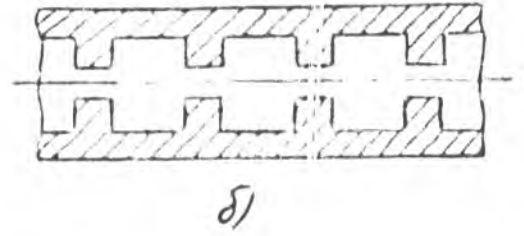
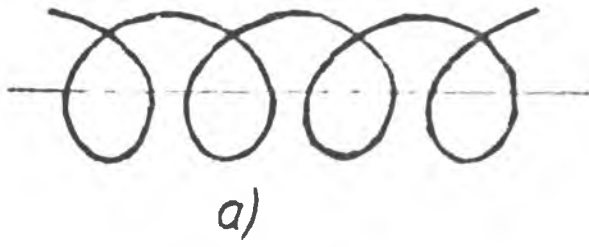


Рис. 5

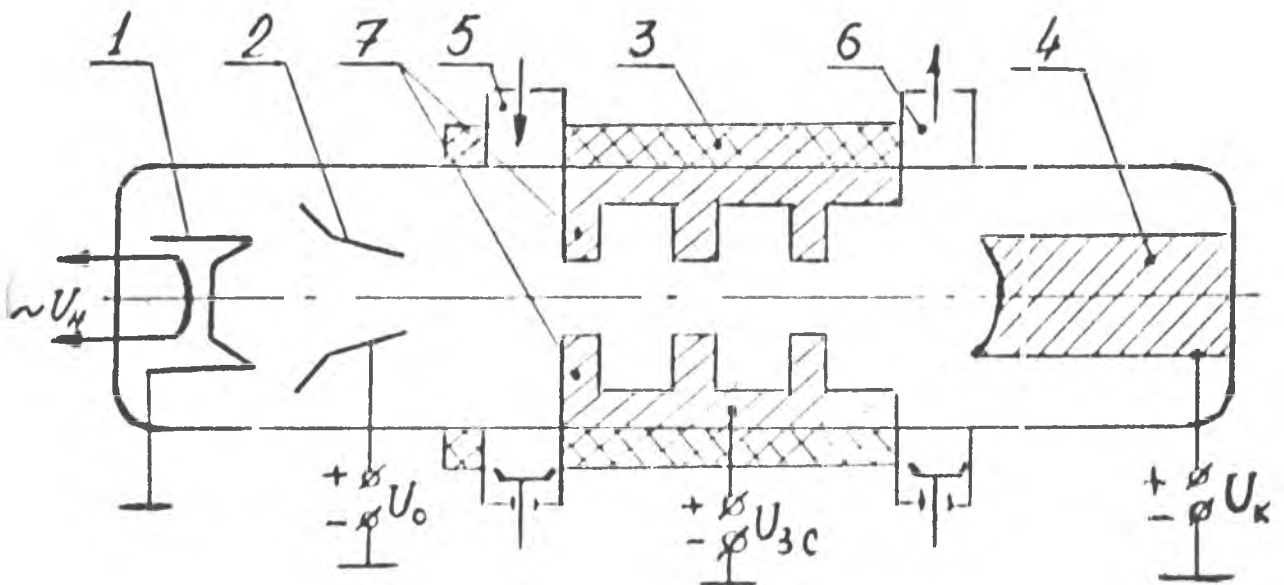


Рис. 6

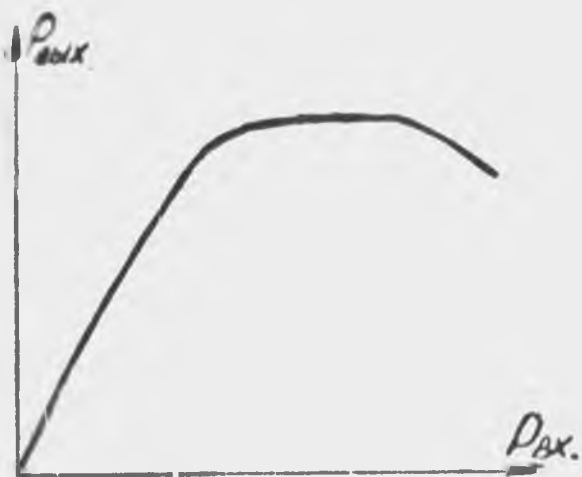


Рис. 7

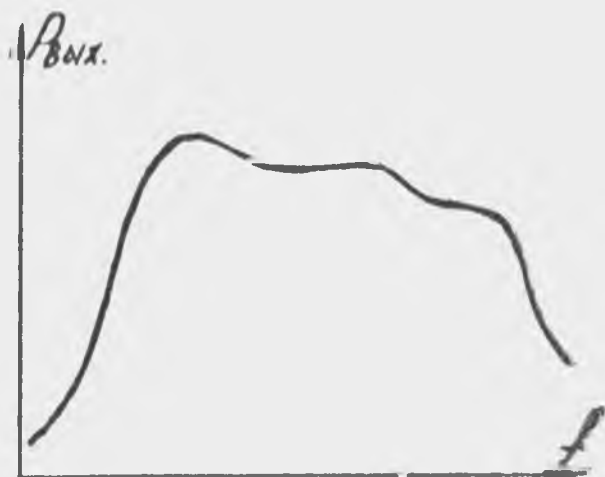


Рис. 8

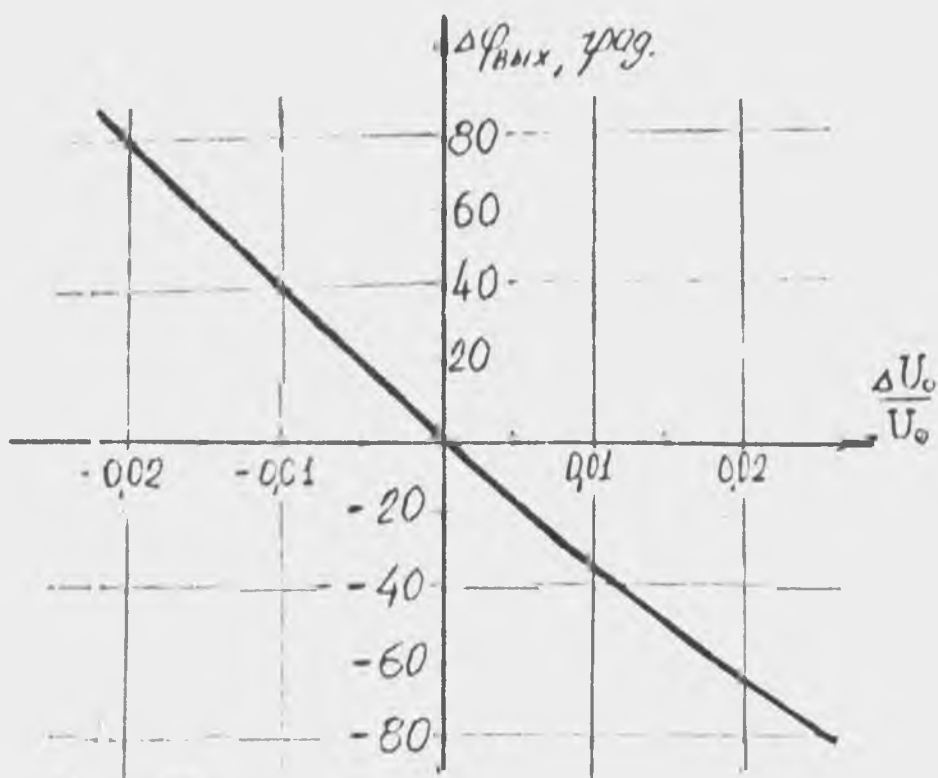


Рис. 9

Составители: Ю.А. Федотов, Л.В. Мокярова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕВ

Подписано к печати 16.11.89г. 76 мат. 16х84 1/16

Бумага оберточная белая, оперативная печать

Усл. п. л. 1,2 Уч.-изд. л. 1,0 Т. 100

Заказ Госплано.

Кубышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П. Королёва,
г. Кубышев, ул. Московское шоссе, 34

Участок оперативной полиграфии КИАИ,
г. Кубышев, ул. Ульяновская, 18.