

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Белова Ольга Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Исследование входного резонатора клистрона

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18301

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. Левичев А. Е.

Оценка научного руководителя

« ____ » _____ 2019 г.

Преподаватель практикума:

к. ф.-м. н. Судников А. В.

Оценка преподавателя практикума

« ____ » _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к. т. н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

« ____ » _____ 2019 г.

Аннотация

В курсовой работе исследовалось взаимодействие модулятора с высокочастотным импульсным сигналом. Рассмотрен метод измерения СВЧ мощности при помощи диодного детектора с предварительной калибровкой и выявлением рабочего диапазона напряжений. Изучены зависимости от пролетного угла коэффициента взаимодействия и коэффициента электронной нагрузки, на их основе сделано предположение о зависимости доли проходящей в клистрон мощности от тока катода. Для ускоряющего зазора измерена вольт-амперная характеристика.

Ключевые слова: клистрон, модулятор, СВЧ мощность, угол пролета, резонанс.

Оглавление

Введение	4
Теоретическая часть	5
Экспериментальная часть	10
Заключение	15
Литература	15

1. Введение

Мощные и сверхмощные клистроны широко используются в генерации микроволн сантиметрового и дециметрового диапазона, радиолокации, навигации, телевидении, исследованиях космического пространства, а также в качестве источников модулированного по плотности потока частиц для линейных резонансных ускорителей. В свою очередь линейные ускорители используются в промышленности для изготовления изотопов химических элементов, в медицине как источники радиоизлучения в радиотерапии и радиохирургии, а в ускорительной технике в качестве инжектора заряженных частиц. Конструкция такого ускорителя определяется необходимостью иметь эффективную высокочастотную систему питания, обеспечивающую создание требуемого электромагнитного поля в ускоряющей структуре, чем и является клистрон. Целью данной работы является экспериментальное исследование модулятора клистрона в СВЧ режиме.

2. Теоретическая часть

2.1. Клистроны

Клистрон — электровакуумный прибор, который преобразует постоянный ток в переменный за счет модуляции скоростей электронов в зазоре объемного резонатора из-за СВЧ электрического поля и модуляции по плотности в пространстве дрейфа, т. е. формирования сгустков электронов.

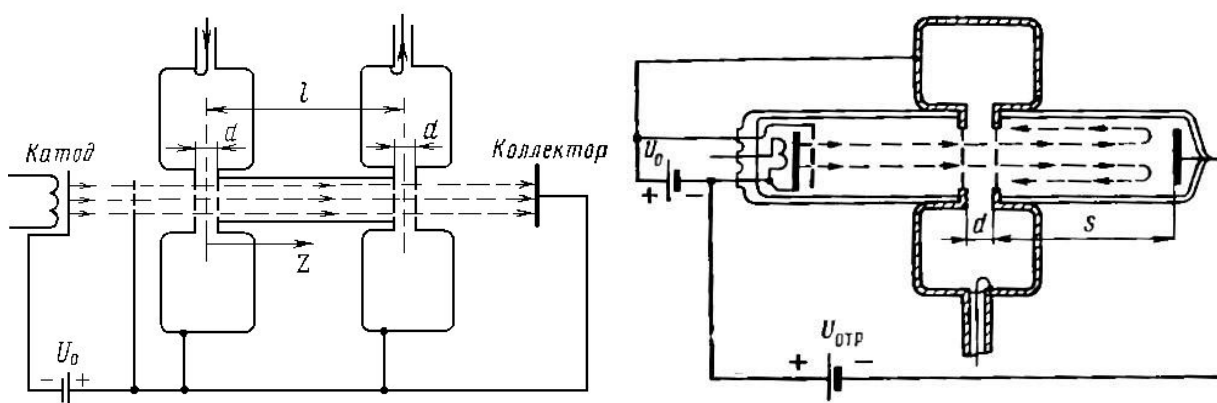


Рис.1 Пролетный (слева) и отражательный (справа) клистроны

Клистроны подразделяются на 2 класса: пролетные и отражательные. В отражательном клистроне электронный поток эмитируется с катода и проходит через единственный резонатор, отражаясь от электрода — отражателя. Предметом исследования этой курсовой работы является входной резонатор пролетных клистронов, также называемый модулятором. Электроны, эмитируемые с катода, ускоряются постоянным напряжением и попадают в модулятор с узким зазором, в котором действует продольное СВЧ электрическое поле. [1] За счет разности фаз этого поля в разные моменты времени электроны замедляются или ускоряются, затем попадают в пространство дрейфа, в котором СВЧ поле отсутствует, с разными скоростями. Быстрые электроны догоняют медленные, т. е. модуляция по скорости преобразуется в модуляцию по плотности пространственного заряда. Сгустки попадают в следующий резонатор и в установившемся

режиме создают в нем наведенный ток той же частоты, что и входной сигнал, протекающий по его стенкам, а разность потенциалов в зазоре влияет на скорость пролетающих через него электронов. При нужном подборе характеристик резонаторов за период тормозится больше электронов, чем ускоряется, и кинетическая энергия переходит в энергию СВЧ электромагнитных колебаний. После прохождения через последний резонатор электроны оседают на коллекторе, а их оставшаяся кинетическая энергия рассеивается в виде тепла.

2.2. Электродинамика электронного потока в резонаторе

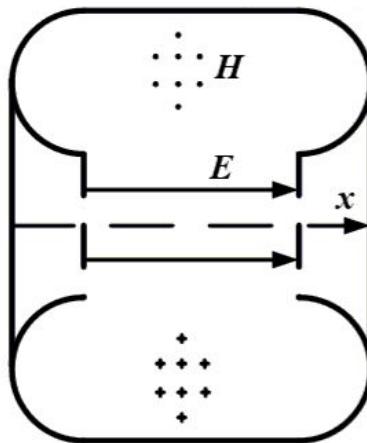


Рис. 2. Поля в резонаторе

В системе СИ уравнения Максвелла имеют вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J}_{\text{полн.}} = \sigma \bar{E} + \frac{d\bar{D}}{dt} + \rho \bar{V} + \bar{J}_{\text{внеш.}}, \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{d\bar{B}}{dt}, \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho, \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0, \end{aligned}$$

где $\overline{D} = \epsilon\epsilon_0\overline{E}$, $\overline{B} = \mu\mu_0\overline{H}$, $\rho\overline{V}$ – плотность конвекционного тока, $\frac{d\overline{D}}{dt}$ – плотность тока смещения. В электровакуумных приборах $\epsilon = 1$, $\mu = 1$, $\sigma = 0$. Тогда, полагая $\overline{J}_{\text{внеш.}} = 0$ получим уравнение непрерывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho\overline{V}) = 0.$$

В потенциальном электрическом поле скорость электрона можно определить из закона сохранения энергии (начальная скорость равна нулю):

$$W_{\text{кин.}} = (\gamma - 1)m_0c^2 = eU, \quad \gamma = 1 + \frac{eU}{m_0c^2}, \quad \beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}},$$

в нерелятивистском случае переходит в: $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}}$.

Важной характеристикой процесса является угол пролета $\theta = 2\pi f\tau$, где f – частота сигнала, τ – время пролета электрона через зазор резонатора. [2] Если угол пролета мал, то на каждый электрон в зазоре действует практически статическое поле. Электронный поток возбуждает объемный резонатор, если одна из гармоник переменной составляющей электронного тока имеет частоту, близкую к собственной частоте резонатора. Для гармонического тока предположим, что при влете в резонатор комплексная величина тока есть $i_\omega(0)e^{j\omega t}$, θ' – угол пролета электронов от входной плоскости до некоторой плоскости внутри зазора. Тогда в рассматриваемой плоскости переменная составляющая тока: $i_\omega(0)e^{j(\omega t - \theta')}$. Если электроны при движении в зазоре не ускоряются, то электронный ток, возбуждающий резонатор, равен току, усредненному по фазе, тогда ток, возбуждающий резонатор:

$$\frac{1}{\theta} \int_0^\theta i_\omega(0)e^{j(\omega t - \theta')} d\theta' = i_\omega(0) \frac{\sin\theta/2}{\theta/2} e^{j(\omega t - \theta/2)} = i_\omega(0) M e^{j(\omega t - \theta/2)},$$

где $M = \frac{\sin\theta/2}{\theta/2}$ – коэффициент взаимодействия, на рис. 3. изображен его график.

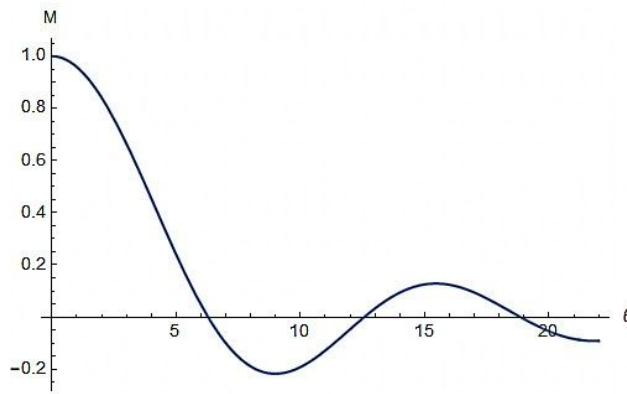


Рис. 3. График зависимости от пролетного угла коэффициента взаимодействия M

Эффективный ток является функцией пролетного угла. Предположим, что переменная составляющая скорости при входе электронного потока в зазор определяется выражением: $v_{\omega}(0)e^{j\omega t}$. Если колебание скорости и пролетный угол в некоторой плоскости θ' малы, то составляющая тока в этой плоскости: $v_{\omega}(0)(\frac{-I_0}{v})j\theta'e^{j(\omega t-\theta')}$, где I_0 – постоянная составляющая тока, v – средняя скорость электронов. Тогда ток, питающий резонатор:

$$\frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} v_{\omega}(0)(\frac{-I_0}{v})j\theta'e^{j(\omega t-\theta')}d\theta' = v_{\omega}(0)(\frac{-I_0}{v})\frac{j\theta}{2}(M - \frac{j\theta N}{6})e^{j(\omega t-\theta/2)},$$

где $N = \frac{24}{\theta^3}(\sin\frac{\theta}{2} - \frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2})$ – коэффициент электронной нагрузки, на рис. 4. изображен его график.

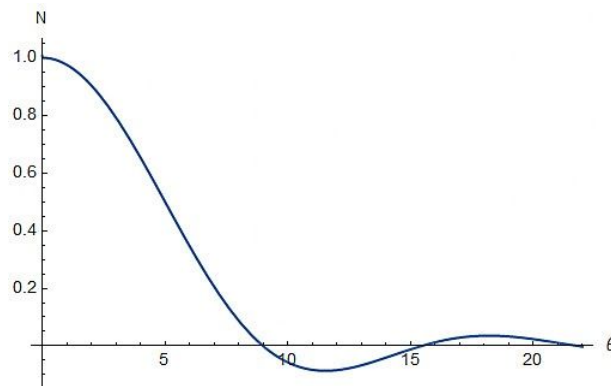


Рис. 4. График зависимости от пролетного угла коэффициента электронной нагрузки N

Введем проводимость электронного потока $G_0 = \frac{I_0}{U_0}$, тогда, пренебрегая релятивистскими эффектами, $v = \sqrt{\frac{2eU_0}{m_0}}$, а ток, питающий резонатор, равен усредненному по фазе:

$$-\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{U_\omega}{2U_0} \frac{I_0}{j\theta} \frac{(j\theta')^2}{2} (M' - \frac{j\theta'N'}{6}) e^{j(\omega t - \theta'/2)} d\theta' = -U_\omega \frac{G_0 j\theta N}{2 \cdot 6} e^{j(\omega t - \theta/2)},$$

где $U_\omega e^{j\omega t}$ – переменное напряжение в зазоре резонатора.

Средняя отдаваемая или получаемая мощность: $\frac{|U_\omega|^2}{2} (-\frac{G_0}{2} \frac{\theta N}{6} \sin \frac{\theta}{2}) = P_{\text{пр.}}$.

Т. к. действующее значение падающей мощности $P_{\text{пад.}} = \frac{|U_\omega|^2}{2} G_0$, получим, что $\frac{P_{\text{пр.}}}{P_{\text{пад.}}} = f(\theta) = g(I_0)$, где $\theta \sim \frac{1}{\sqrt{U_0}} \sim \frac{1}{\sqrt[3]{I_0}}$. Теоретическая огибающая функции g – кубический корень, т. е. предположительно зависимость выглядит следующим образом:

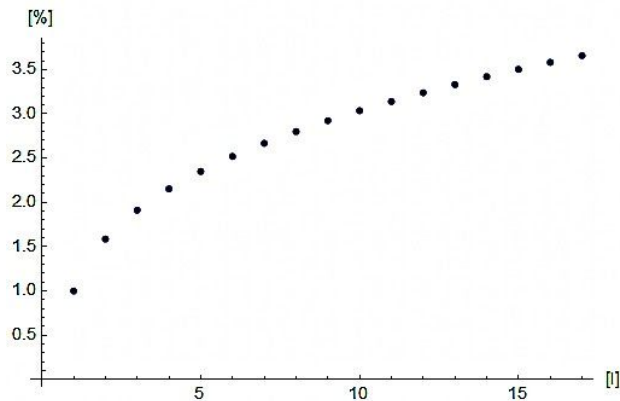


Рис. 5. Зависимость доли проходящей в клистрон мощности от катодного тока

3. Экспериментальная часть

3.1. Методика измерений

Для исследуемого клистрона резонансная частота 2856 МГц (период 350 пс), ускоряющее напряжение до 350 кВ, катодный ток до 350 А. Входной сигнал – импульсный, частота повторений до 50 Гц, длина импульса порядка 4,5-5 мкс, амплитуда порядка 500 Вт.

Калибровка модуля М33402-2 (диодная головка)

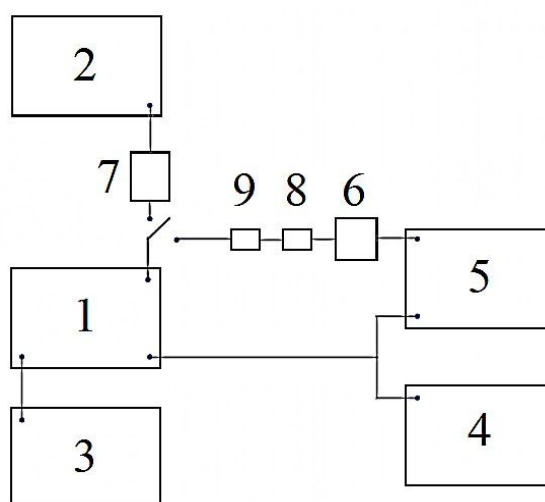


Рис. 6. Схема установки для калибровки диодной головки: 1 - усилитель СВЧ (У2856-4ИЯФ); 2 - ваттметр Я2М-66; 3 - генератор MGX Analog Signal Generator N583A; 4 - генератор АКИП-340812; 5 - осциллограф Fluke Scopemeter 190-102; 6 - модуль М33402-2 (диодная головка); 7 - преобразователь измерительный калориметрический 4.681.467; 8 - аттенюатор 20 дБ; 9 - аттенюатор 10дБ

Схема установки для определения рабочего диапазона мощностей диодной головки изображена на рис. 6. Диодная головка является детектором СВЧ колебаний, сигнал с которой может зарегистрировать ваттметр, причем в рабочем диапазоне зависимость проходящей мощности от напряжения квадратичная. [3] При помощи СВЧ анализатора цепей серии PNA-L N5230C может быть измерено ослабление сигнала на кабеле и аттенюаторах α . Для преобразователя измерительного калориметрического максимальные значения: импульсной мощности – 1,5 кВт, средней мощности – 1 Вт. На

генераторе АКИП выставлены параметры: импульсный сигнал, частота повторений – $F = 10$ Гц, длительность импульса – 2 мкс, амплитуда сигнала – 20 В. Частота генератора MGX – $\frac{2883}{2}$ МГц. Снимаемая ваттметром мощность P_w является усредненной, импульсная мощность сигнала $P_{\text{имп.}} = \frac{P_w}{\tau F}$, где τ – длительность импульса, снимаемая с осциллографа. С учетом ослабления на аттенюаторах импульсная мощность, проходящая через диодную головку, $P_{\text{д.г.}} = P_{\text{имп.}} 10^{\frac{\alpha}{10}}$.

Экспериментальное определение мощности, проходящей в клистрон

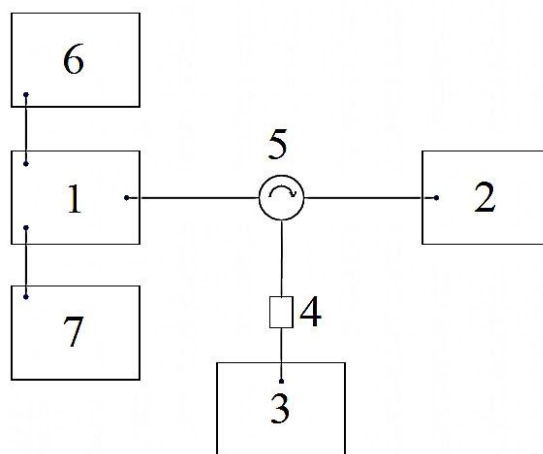


Рис. 7. Схема установки для определения мощности, проходящей в клистрон: 1 - усилитель СВЧ (У2856-4ИЯФ); 2 - клистрон; 3 - ваттметр Я2М-66; 4 - модуль М33402-2 (диодная головка); 5 - циркулятор; 6 - генератор MGX Analog Signal Generator N583A; 7 - генератор АКИП-340812

Схема для определения зависимости проходящей в клистрон мощности от катодного тока представлена на рис. 7. На генераторе АКИП выставлены параметры: импульсный сигнал, частота повторений – 5 Гц, длительность импульса – 2 мкс, амплитуда сигнала – 15 В. На генераторе MGX установлена частота 1428,5 МГц, на выходе усилителя частота сигнала удваивается – 2857 МГц. Циркулятор устроен таким образом, что через него может течь в направлении от усилителя к клистрону, от клистрона к ваттметру, от ваттметра к усилителю. При помощи СВЧ анализатора цепей

серии PNA-L N5230C может быть измерено ослабление сигнала на кабеле между циркулятором и клистроном $\alpha_{\text{кл.}}$, на циркуляторе между усилителем и клистроном α_{12} и между клистроном и диодной головкой α_{23} , на кабеле к ваттметру $\alpha_{\text{каб.}}$. Таким образом ваттметр будет показывать среднюю отраженную мощность, выходящую из входного резонатора, ослабленную на кабелях и циркуляторе, $P_{\text{отр.имп.}} = \frac{P_{\text{отр.}}}{\tau F} 10^{\frac{\alpha_{\text{кл.}} + \alpha_{23} + \alpha_{\text{каб.}}}{10}}$, где τ – длительность импульса, F – частота повторений. Тогда, если P_w – импульсная мощность, поступающая в резонатор, то проходящая через резонатор мощность $P_{\text{пр.}} = P_w - P_{\text{отр.имп.}}$. Также к ускоряющему зазору подключен осциллограф, который измеряет катодный ток и ускоряющее напряжение. Первенеанс электронного пучка в ускоряющем зазоре $p = 1,7 \times 10^{-6}$, т. е. $I = pU^{3/2}$.

3.2. Результаты

Измеренное ослабление $\alpha = -33,11$, $\tau = 5$ мкс. Результаты калибровки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Калибровка диодной головки

$U_{\text{д.г.}}, \text{ мВ}$	$P_w, \text{ мВт}$	$P_{\text{имп.}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{д.г.}}, \text{ мВт}$
760	18,30	366,0	178,8
560	11,98	239,6	117,1
356	8,14	162,8	79,6
300	6,83	136,6	66,7
170	2,92	58,4	28,5
88	1,16	23,2	11,3
36	0,14	8,2	4,0

На рис. 8 показана аппроксимирующая квадратичная зависимость, на которую ложатся 4 точки, т. е. в диапазоне от 0 - 6,83 мВт снимаемой на ваттметре мощности диодная головка работает корректно.

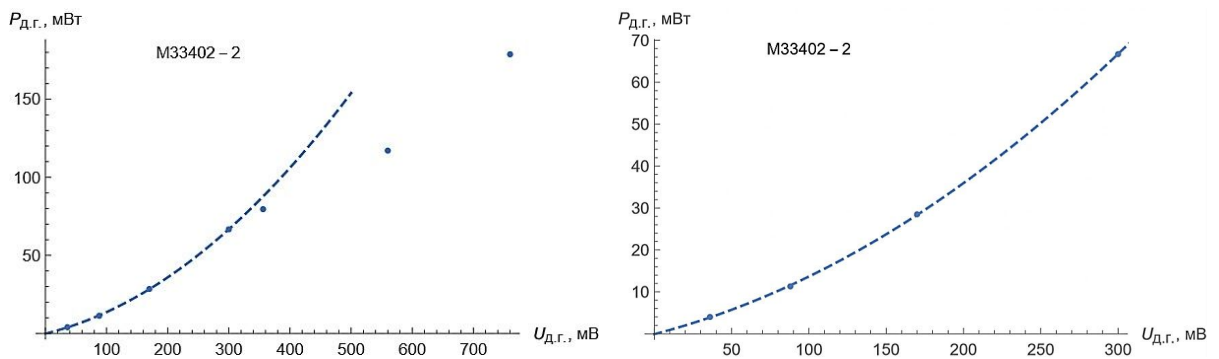


Рис. 8. Зависимость импульсной мощности на диодной головке от напряжения

Измеренные ослабления: $\alpha_{\text{кл.}} = -0,8$, $\alpha_{23} = \alpha_{12} = -0,65$, $\alpha_{\text{каб.}} = -1,22$. Также при помощи ваттметра и диодной головки измерена мощность, падающая в резонатор. Средняя без учета ослабления: $P_{w \text{ ср.}} = 4,72$ мВт, импульсная с учетом ослабления: $P_w = \frac{P_{w \text{ ср.}}}{\tau F} 10^{\frac{\alpha_{\text{кл.}} - \alpha_{\text{каб.}}}{10}} = 519,9$ Вт. В таблице 2 представлены результаты измерений проходящей мощности в зависимости от тока.

Таблица 2. Измерение проходящей мощности в зависимости от тока катода

$I, \text{ A}$	$P_{\text{отр.ср.}}, \text{ мВт}$	$P_{\text{отр.}}, \text{ мВт}$	$P_{\text{имп.отр.}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{имп.пр.}}, \text{ Вт}$	$\frac{P_{\text{имп.пр.}}}{P_{\text{пад.}}}, \%$
0,0	2,52	4,7	466,0	53,9	10,4
10,0	2,55	4,7	471,6	48,4	9,3
32,2	2,04	3,8	377,3	142,7	27,4
85,4	1,77	3,3	327,3	192,6	37,0
135,0	1,70	3,1	314,4	205,6	39,5
169,0	1,62	3,0	299,6	220,3	42,4
190,0	1,53	2,8	282,9	237,0	45,6
214,0	1,44	2,7	266,3	253,6	48,8
222,0	1,46	2,7	270,0	249,9	48,1
242,0	1,34	2,5	247,8	272,1	52,3

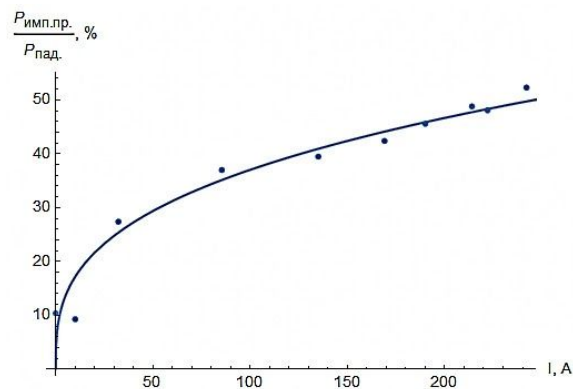


Рис. 9. Зависимость доли проходящей через резонатор мощности от тока катода

На рис. 10 представлена зависимость тока катода в ускоряющем промежутке в зависимости от напряжения. В диапазоне до 200 кВ ускоряющий промежуток работает в режиме 3/2.

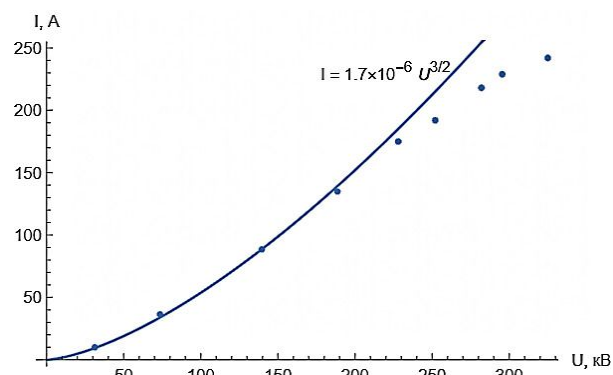


Рис. 10. Зависимость тока катода от напряжения ускоряющего промежутка

4. Заключение

В ходе курсовой работы была проведена калибровка модуля М33402-2 и выявлен диапазон квадратичной зависимости мощности от напряжения. В последующем модуль может быть использован для измерения мощности СВЧ сигналов. Построена вольт-амперная характеристика ускоряющего промежутка клистрона. В диапазоне до 200 кВ выполняется закон $3/2$, хотя предположительно этот диапазон должен быть шире. Это может быть связано, например, с окислением катода на воздухе. Выявлена возрастающая зависимость проходящей в резонатор мощности от катодного тока, которая хорошо аппроксимируется корнем кубической степени. Максимальный процент прохождения мощности в резонатор – 52,3% при токе 242 А.

5. Литература

- [1] Клистронные усилители / А.З. Хайков. М.: Связь, 1974
- [2] Клистроны / Под ред. Наumenко Е. Д. М.: Советское радио, 1952
- [3] Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1970