

ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МАГНЕТРОНА МИ-505

*А.А. Бондусь, В.П. Горбачев, В.П. Степанчук,
Р.В. Максимов, Д.В. Мутасов, В.К. Марченко*

В работе представлены некоторые результаты исследования трехсантиметрового магнетрона. Измерены зависимости активной и реактивной электронной проводимости от анодного напряжения и высокочастотного напряжения на колебательной системе. Построены аппроксимирующие формулы, необходимые для расчета переходных процессов в СВЧ-системах ускорителей электронов. Проводится их сравнение с известными из литературы аналогичными соотношениями, полученными для десятисантиметрового магнетрона.

Введение

При исследовании и разработке СВЧ-систем ускорителей электронов часто необходим расчет не только установившихся, но и переходных процессов. В качестве источников мощности в классических микротронах и линейных ускорителях электронов (ЛУЭ) небольшой мощности обычно используются магнетроны. В работе [1] была предложена модель магнетрона, предназначенная для расчета переходных процессов в СВЧ-системах ускорителей электронов методом эквивалентных схем. Анодный блок магнетронного генератора для основного типа колебаний представлен в виде одиночного колебательного контура с сосредоточенными параметрами. Контур нагружен электронной проводимостью магнетрона и длинной линией, в которой распространяются падающая и отраженная нагрузкой волны. Были определены параметры модели, в том числе и зависимости компонент электронной проводимости, от высокочастотного и анодного напряжений на контуре магнетрона. Методика измерения этих параметров подробно описана в [2]. Параметры модели были определены для магнетрона десятисантиметрового диапазона МИ-202.

Освоение трехсантиметрового диапазона привело к созданию малогабаритных микротронов и ЛУЭ. При разработке таких машин (особенно микротронов) требуется проведение расчетов переходных процессов в их СВЧ-системах. Для этого необходимо знание электронной проводимости магнетронов. В настоящей работе представлены результаты измерений электронной проводимости магнетрона МИ-505, который наиболее часто применяется в микротронах и ЛУЭ трехсантиметрового диапазона.

1. Методика измерений

Эквивалентная электрическая схема магнетрона, работающего на рассогласованную нагрузку, приведена на рис. 1. Параметры контура магнетрона и потери в его выходном трансформаторе измеряются на низком уровне мощности. Доступными измерению на высоком уровне мощности являются следующие величины: мощность, рассеиваемая в нагрузке, P_n ; частота генерируемых колебаний f_r ; анодный ток I_a и напряжение магнетрона U_a .

Соотношения, позволяющие рассчитать активную и реактивную электронные проводимости магнетрона, приведенные в [2], вытекают из баланса проводимостей в схеме рис. 1. Все проводимости здесь относительные, нормированные на эквивалентную проводимость тракта Y_0 , а активная проводимость нагрузки выражена через ее коэффициент стоячей волны

$$G_3 = \begin{cases} G_k + \frac{\rho_n}{1 + \rho_n/G_T}, & \text{если } \theta_n = (2n + 1)\pi, \\ G_k + \frac{1}{\rho_n + 1/G_T}, & \text{если } \theta_n = 2n\pi, \end{cases} \quad (1)$$

$$B_3 = -2Q_{вн} \frac{f_r - f_0}{f_0}, \quad \theta_n = n\pi,$$

где ρ_n – коэффициент стоячей волны нагрузки; θ_n – электрическая длина линии, соединяющей нагрузку с магнетроном; G_k – проводимость, контура магнетрона; G_T – проводимость учитывающая потери в выходном трансформаторе магнетрона; $Q_{вн}$ – внешняя добротность магнетрона; f_0 – его резонансная частота. Соотношения (1) применимы для двух значений электрической длины линии, соединяющей магнетрон с нагрузкой, – в «фазе нагрузки» и в «фазе разгрузки», которым соответствуют экстремальные значения выходной мощности. Именно эти формулы были использованы в наших исследованиях электронной проводимости магнетрона, работающего в трехсантиметровом диапазоне.

Исследованию подлежал магнетрон МИ-505 с анодным блоком, имеющим следующие параметры: $G_k = 0.42$, $G_T = 40.0$, $Q_{вн} = 311$, $Q_0 = 732$. Они были определены на низком уровне мощности с помощью измерителя полных сопротивлений Р2-67. Для измерений на высоком уровне была собрана установка, схема которой представлена на рис. 2. Все элементы волноводного тракта имеют сечение

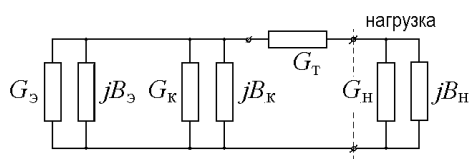


Рис. 1. Эквивалентная схема магнетрона, соединенного с рассогласованной нагрузкой: G_3 , B_3 – активная и реактивная электронная проводимость магнетрона, G_k , B_k – активная и реактивная проводимость контура магнетрона, G_T – проводимость потерь в выходном трансформаторе магнетрона. G_n , B_n – активная и реактивная проводимость нагрузки

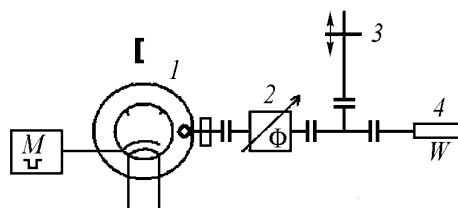


Рис. 2. Схема измерения электронной проводимости магнетрона: 1 – магнетрон; 2 – фазовращатель; 3 – подвижный короткозамыкающий поршень; 4 – согласованная нагрузка; М-модулятор

$28.5 \times 12.6 \text{ мм}^2$. Фазовращатель 2 содержит фторопластовую пластину, перемещаемую вдоль широкой стенки волновода; электрическая длина линии изменяется, примерно, на $5\pi/6$; потери в волноводе не превосходят 0.8 дБ, а $\rho_n \leq 1.15$. Для рассогласования нагрузки используется тройник в Е-плоскости и дроссельный короткозамыкающий поршень 3. Мощность измерена калориметрическим методом, для питания магнетрона используется модулятор с неполным разрядом накопителя.

Зависимость компонент электронной проводимости от СВЧ напряжения определялась следующим образом. При заданной величине анодного напряжения и величинах $\rho_n = 1.2, 1.4, \dots, 3.0$ определялись значения θ_n , соответствующие экстремумам мощности, и сами экстремальные значения мощности. Затем с помощью соотношения (1) вычислялись компоненты электронной проводимости. Мощность в нагрузке связана с мощностью в контуре магнетрона и на его электронной проводимости соотношением

$$P_3 = P_n \left(G_k + \frac{G_n}{1 + G_n/G_T} \right) \left(1 + \frac{G_n}{G_T} \right)^2. \quad (2)$$

Амплитуда переменного напряжения на электронной проводимости вычислялась в относительных единицах

$$V_3 = K \sqrt{\frac{2P_3}{G_3}}. \quad (3)$$

Нормирующий множитель K выбирался таким образом, чтобы при согласованной нагрузке и номинальном анодном напряжении $V_3 = 1$

$$K^2 = \frac{G_k + \frac{1}{1 - 1/G_T}}{2P_{3\text{сн}}}. \quad (4)$$

Здесь $P_{3\text{сн}}$ – мощность, отдаваемая на согласованную нагрузку при номинальном анодном напряжении. Относительное напряжение на контуре магнетрона рассчитывалось с помощью формул (2)–(4). Каждому значению коэффициента стоячей волны ρ_n соответствуют два значения компонент электронной проводимости и переменного напряжения на ней.

2. Результаты измерения и их аппроксимации

Описанная выше методика расчета компонент электронной проводимости магнетрона была применена для расчета указанных параметров магнетрона МИ-505, разработанного для трехсантиметрового диапазона. Результаты расчета приведены на рис. 3. Штриховой линией нанесены аппроксимирующие кривые, построенные по формулам работ [1, 2],

$$G_3(V_3, U_a) = F(U_a) V_3 \frac{1 + V_0^2}{V_3^2 + V_0^2}, \quad [1, \text{ф. (3)}]$$

$$B_3(V_3) = \frac{-0.26(V_3 - V_3^2)}{0.013 + V_3^2}, \quad [2, \text{ф. (II.3.14)}]$$

где $V_0 = 0.125$ – напряжение, соответствующее максимуму электронной активной проводимости. Зависимость активной электронной проводимости от анодного на-

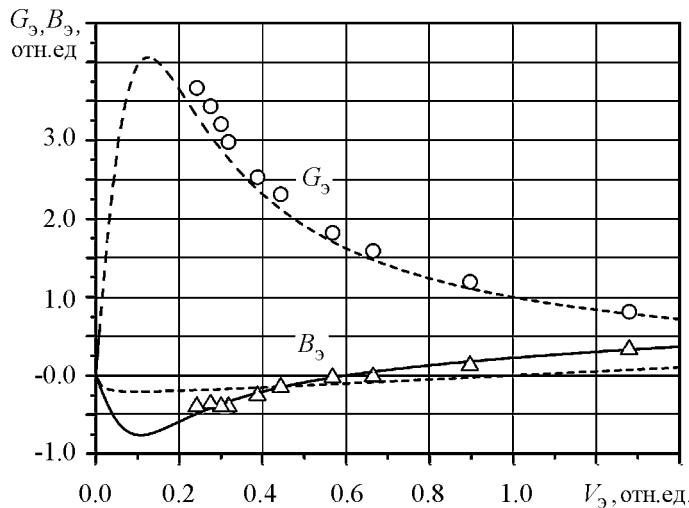


Рис. 3. Зависимость компонент электронной проводимости от ВЧ потенциала: --- расчеты по аппроксимирующим формулам работ [1, 2]; $\circ\circ$ и $\Delta\Delta$ результаты экспериментальных измерений; — расчеты по аппроксимирующей формуле (5)

пряжения здесь описывается как и в [1] с помощью функции $F(U_a)$

$$F(U_a) = \begin{cases} 0, & \text{если } U_a < U_{\text{ан}}, \\ \frac{(U_a - U_{\text{ан}})}{(U_{\text{а0}} - U_{\text{ан}})}, & \text{если } U_a \geq U_{\text{ан}}, \end{cases}$$

где $U_{\text{а0}}$ – номинальное анодное напряжение магнетрона, $U_{\text{ан}}$ – пороговое напряжение магнетрона. Значками « Δ » и « \circ » отмечены точки, полученные по методике, изложенной в разделе 1, с использованием экспериментальных измерений в трехсантиметровом диапазоне.

Как видно из графиков, аппроксимирующие кривые, полученные в [1, 2], хорошо подтверждаются экспериментальными измерениями, только в части расчета активной проводимости G_3 магнетрона. Для расчета реактивной составляющей электронной проводимости B_3 аппроксимирующая формула работы [2] в трехсантиметровом диапазоне не работает. С использованием метода наименьших квадратов и результатов расчета реактивной составляющей электронной проводимости по экспериментальным измерениям в трехсантиметровом диапазоне была получена следующая аппроксимирующая формула для B_3 магнетрона МИ-505:

$$B_3(V_3, U_a) = 0.2\sqrt{F(U_a)}\frac{V_3^3 + 1.125V_3^2 - 1.11V_3}{V_3^2 + V_0^2}. \quad (5)$$

Результаты расчета по этой формуле нанесены на рис. 3 сплошной линией. Как видно, она хорошо аппроксимирует экспериментальные результаты и может быть использована разработчиками.

Заключение

Полученная в работе формула для аппроксимации реактивной составляющей электронной проводимости магнетрона с формулой для активной составляющей электронной проводимости, полученной в работе [1], могут быть использованы при расчетах переходных процессов в высокочастотных системах ускорителей электронов,

выполненных на основе магнетрона МИ-505, в частности, для уточнения результатов, полученных в [3], и определения параметров элемента связи анодного блока магнетрона с ускоряющим резонатором при разработке макета объединенной СВЧ-системы микротрона [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №07-02-01288-а).

Библиографический список

1. *Заворотыло В.Н., Милованов О.С.* Модель магнетронного генератора для расчета переходных процессов // Ускорители. М: Атомиздат, 1977. № 16. с. 34.
2. *Заворотыло В.Н.* Возбуждение высокочастотных колебаний и ускорение частиц в линейных ускорителях электронов. Дисс. канд. техн. наук. М.: МИФИ, 1979.
3. *Бондусь А.А., Горбачев В.П., Степанчук В.П.* Совмещенная СВЧ-система микротрона // The Program and Abstracts of Fourteenth Int. Workshop Beam Dynamics & Optimization. July 3–6, 2007. Saint-Petersburg: St. Petersburg State University. 2007. P. 13.
4. *Бондусь А.А., Горбачев В.П., Степанчук В.П.* Переходные процессы в моноблоке магнетрон – ускоряющий резонатор микротрона // Вестник СПбГУ. 2008 Сер. 10, вып. 3. С. 34.

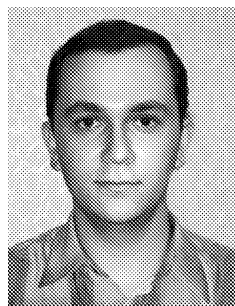
*Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского
ОАО Тантал, Саратов*

*Поступила в редакцию 18.12.2008
После доработки 25.12.2008*

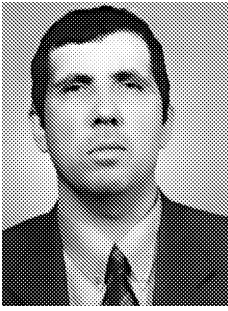
X-BAND MAGNETRON ELECTRONIC CONDUCTIVITY

*A.A. Bondus', V.P. Gorbachev, V.P. Stepanchuk,
R.V. Maksimov, D.V. Mutasov, V.K. Marchenko*

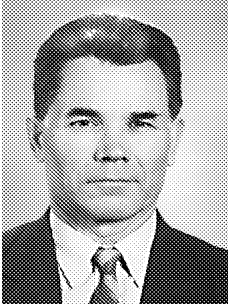
Some results of the X-band magnetron research are presented. Its active conductivity and the reactive one are measured in dependence both on anode voltage and RF voltage of the oscillatory systems. Approximating formulas are built for these dependences. This is necessary for transient processes calculation in microwave systems of X-band electron accelerators. The comparison is carried out with the known relations for the S-band magnetron.



Бондусь Анатолий Александрович – родился в Саратове (1985), окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (2007) по специальности радиофизика и электроника. После окончания СГУ работает в ОМФ НИИЕН СГУ ЛЯФиУ. Является соавтором двух статей в области ускорителей заряженных частиц.



Горбачев Валерий Петрович – родился в городе Печора республики Коми (1955). Окончил Саратовский университет (1977) по специальности физика. После окончания университета работал в лаборатории ускорителей НИИМФ СГУ (с 2003 года лаборатория ядерной физики и ускорителей ОМФ НИИЕН). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в НИИЯФ МГУ (2007) в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники. Соавтор 35 статей и 6 авторских свидетельств. С 1999 года член программного комитета международного совещания Beam Dynamics & Optimization, с 2008 года член оргкомитета.



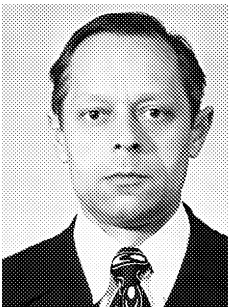
Степанчук Виктор Петрович – родился (1929) в деревне новая Липовка Саратовской области, окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1954). После окончания университета работает в СГУ. Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (СГУ, 1966) и доктора технических наук в МИФИ (1984) в области ускорителей заряженных частиц. Опубликовал порядка 120 научных работ (в том числе около 40 авторских свидетельств) по ускорителям заряженных частиц и электронике СВЧ.



Максимов Роман Вячеславович – родился (1985) в поселке Кушмурун Кустанайской области Республики Казахстан. Окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (2007) по специальности радиофизика и электроника. Аспирант СГУ.



Мутасов Дмитрий Валентинович – родился (1985) в селе Раздольное Лысогорского района Саратовской области. Окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (2007) по специальности радиофизика и электроника. После окончания СГУ работает в ОМФ НИИЕН СГУ ЛЯФиУ.



Марченко Вячеслав Константинович – родился в Ростове-на-Дону (1936), окончил Таганрогский радиотехнический институт (1959). После окончания института работает в ОАО «Тантал» на инженерных должностях.