



12. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. О синхронизации хаотических автоколебаний в распределенной системе «винтовой электронный поток – встречная электромагнитная волна» // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48, №1. С.116–124.
13. Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. Синхронизация распределенных электронно-волновых автоколебательных систем с обратной волной // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т.XLVII, №5–6. С.343–372.
14. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Popov P.V., Rempen I.S. Chaotic synchronization of coupled electron-wave systems with backward waves // Chaos. 2005. Vol.15, №1. P.013705.
15. Rosenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurths J. Phase synchronization of chaotic oscillators // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol.76, №11. P.1804–1807.
16. Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I. Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems // Phys. Rev. E. 1995. Vol.51, №2. P.980–994.
17. Rosenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurths J. From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol.78, №22. P.4193–4196.
18. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol.64, №8. P.821–824.
19. Hramov A.E., Koronovskii A.A. An approach to chaotic synchronization // Chaos. 2004. Vol.14, №3. P.603–610.
20. Афраймович В.С., Некоркин В.И., Оситов Г.В., Шалфеев В.Д. Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации / ИПФ АН СССР. Горький, 1989.
21. Kocarev L., Tasev Z., Stojanovski T., Parlitz U. Synchronizing spatiotemporal chaos // Chaos. 1997. Vol.7, №4. P.635–643.
22. Bragard J., Arecchi F.T., Boccaletti S. Characterization of synchronized spatiotemporal states in coupled non-identical complex Ginzburg–Landau equations // Intern. J. Bifurcation and Chaos. 2000. Vol.10. P.2381.
23. Короновский А.А., Попов П.В., Храмов А.Е. Обобщенная хаотическая синхронизация в связанных уравнениях Гинзбурга–Ландау // ЖЭТФ. 2006. Т.130, №4(10). С.748–764.
24. Tasev Z., Kocarev L., Junge L., Parlitz U. Synchronization of Kuramoto–Sivashinsky equations using spatial local coupling // Intern. J. Bifurcation and Chaos. 2000. Vol.10, №4. P.869–873.
25. Попов П.В., Филатов Р.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Синхронизация пространственно-временного хаоса в пучково-плазменных системах со сверхкритическим током // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31, №6. С.9–16.
26. Filatov R.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. Chaotic synchronization in coupled spatially extended beam-plasma systems // Phys. Lett. A. 2006. Vol.358. P.301–308.
27. Fukuyama T., Kozakov R., Tcstrich H., Wilke C. Spatiotemporal synchronization of coupled oscillators in a laboratory plasma // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol.96. P.024101.
28. Короновский А.А., Филатов Р.А., Храмов А.Е. Хаотическая синхронизация в пучково-плазменных системах со сверхкритическим током // Радиотехника и электроника. 2007. Т.52, №3. С.362–372.
29. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003.
30. Hramov A.E., Khramova A.E., Koronovskii A.A., Boccaletti S. Synchronization in networks of slightly nonidentical elements // IJBC. 2008. Vol.18, №3. P.258–264.

УДК 621.384.63

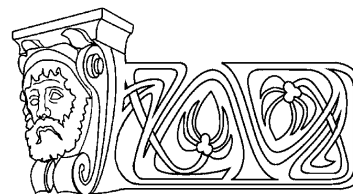
ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАЛОГАБАРИТНОГО МИКРОТРОНА ТРЕХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

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

Саратовский государственный университет
E-mail: vag55@rambler.ru

В работе представлены результаты расчета высокочастотной и магнитной систем трехсантиметрового микротрона. Высокочастотную систему предполагается выполнить на основе моноблока магнетрон-ускоряющий резонатор. Приведены результаты анализа стационарных и переходных процессов в такой системе. Определены требования к параметрам устройства связи анодного блока магнетрона с ускоряющим резонатором. Представлены результаты расчета магнитной системы трехсантиметрового микротрона на 5 МэВ на основе постоянных магнитов. Магнитная система на постоянных магнитах микротрона той же энергии имеет вдвое меньшую массу и более высокую однородность поля.

Ключевые слова: микротрон, магнетрон, ускоряющий резонатор, магнитная система.



Prospects of Perfecting the Parameters Small-Dimensioned X-Band Microtron

A.A. Bondus, V.P. Gorbachev, V.P. Stepanchuk,
R.V. Maximov, D.V. Mutasov

In paper presented results of the calculation of microwave and magnetic systems X-band microtron. Microwave system is expected to run for the base monoblock monoblock magnetron-accelerating cavity. The results of the analysis of stationary processes and transients in such system are presented. The requirements to parameters of coupling element in of the magnetron's anode block with accelerating cavity are determined. The calculations of magnetic system for 5 MeV X-band microtron on the base permanent magnets are executed. Permanent magnet for the microtron same energy has double smaller mass and more high homogeneity of magnetic field.

Key words: microtron, magnetron, accelerating cavity, magnetic system.



Введение

После первой публикации, где была описана идея микротрона [1], были предложены и реализованы эффективные способы инжекции электронов в такой ускоритель [2] и эффективные режимы ускорения [3]. После чего началось применение этих машин для решения фундаментальных и прикладных задач. Освоение трехсантиметрового диапазона с целью создания малогабаритных, транспортабельных микротронов было затруднено из-за ограниченной электрической прочности ускоряющего резонатора. В СГУ был предложен и реализован режим ускорения с малым приростом энергии за оборот (300 кэВ $\Omega = 0.62$) [4], который используется во всех действующих микротронах трехсантиметрового диапазона. Дальнейшее развитие микротронного направления в СГУ описано в [5].

Одним из возможных путей улучшения массогабаритных характеристик классических микротронов является создание совмещенных систем СВЧ генератор – ускоряющий резонатор, в которых ускоряющий резонатор является частью анодного блока генератора либо связан с ним непосредственно.

В настоящей работе представлены результаты исследования высокочастотной системы компактного микротрона на основе моноблока магнетрон-ускоряющий резонатор и результаты исследования магнитной системы.

Во всех существующих классических микротронах ведущее магнитное поле создается электромагнитами броневое типа, как было предложено еще в [2]. Их главные недостатки – большой вес, затраты мощности для питания, необходимость стабилизации тока, необходимость охлаждения водой или сжатым воздухом. Постоянные магниты лишены указанных недостатков и выгодно отличаются высокой надежностью. В настоящее время существуют магнитные материалы на основе редкоземельных металлов, такие как Ne-Fe-B и Sm-Co. Они обладают высокими энергетическими показателями: остаточной индукцией (до 1.41 Т) и значением энергетического произведения ВНмакс (до 360 кДж/м³). На основе таких материа-

лов были созданы рециркуляторы разрезных микротронов [6, 7]. С помощью программы Poisson были проведены расчеты магнитной системы микротрона трехсантиметрового диапазона на основе постоянных магнитов, выполненных из Ne-Fe-B. Они показали, что минимально возможное расстояние между внешней стенкой обратного магнитопровода и областью однородного ведущего магнитного поля микротрона порядка 20 мм. Это примерно половина длины волны в трехсантиметровом диапазоне. Далее будем рассматривать соединение анодного блока магнетрона и ускоряющего резонатора микротрона устройством связи, длина которого не короче половины длины волны колебаний.

СВЧ-система

СВЧ-система микротрона работает в узкой полосе частот. Колебательные процессы в ней вполне удовлетворительно описываются с помощью эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами. В качестве модели ускоряющего резонатора и магнетронного генератора используем одиночные колебательные контуры с сосредоточенными постоянными, к ним присоединены длинные линии. Высокочастотное напряжение на контурах представлено как сумма напряжений падающей и отраженной волн. Эквивалентная схема СВЧ-системы микротрона содержит протяженный элемент связи, в котором распространяются падающие и отраженные волны (рис. 1). Устройство связи анодного блока магнетрона с ускоряющим резонатором здесь показано в виде четырехполюсника. Модуль его коэффициента передачи $S_{12} = S_{21}$, а электрическая длина $\theta_{12} = \theta_{21} = 2\pi l_{12}/\Lambda$, где l_{12} – геометрическая длина устройства связи, а Λ – длина волны колебаний в нем.

Индексом 1 отмечены параметры контура магнетрона, напряжение на контуре магнетрона, а также падающая и отраженная от него волны. I_e, I_n – ток, наведенный электронным потоком магнетрона в его замедляющей системе, и шумовой ток. Индексом 2 отмечены параметры контура ускоряющего резонатора, напряжение на контуре ускоря-

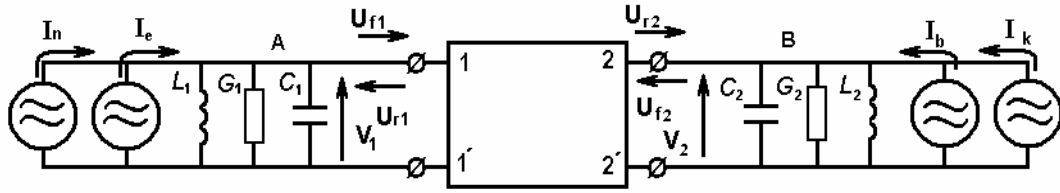


Рис. 1. Эквивалентная схема моноблока магнетрон-ускоряющий резонатор микротрона

ющего резонатора, а также падающая и отраженная от него волны. I_k , I_b – нагружающие резонатор ток катода и ток пучка ускоренных электронов со всех орбит. Напряжения падающих и отраженных волн связаны с напряжением на контурах соотношениями: $v_1 = u_{1f} + u_{1r}$, $v_2 = u_{2f} + u_{2r}$. Рассматривается взаимодействие пучка и ускоряющего резонатора только на первой гармонике тока. Используем известную модель электронного пучка микротрона с запаздыванием «релейного» типа [8]. Ток пучка в момент времени t определяется амплитудой поля в момент времени $t - t_e$, где t_e – время пролета электрона от первой до последней орбиты. Ток зависит от амплитуды колебаний в резонаторе нелинейно и существует только в ограниченном диапазоне нормированных амплитуд $1 < v_2 < 1.25$.

В контуре магнетрона также течет ток, наведенный его электронным потоком. Рассматривается взаимодействие на первой гармонике тока. Для его описания удобно ввести электронную проводимость. Используемая зависимость электронной проводимости магнетрона от высокочастотного и анодного напряжений соответствует жесткому характеру возбуждения [9].

Уравнения колебаний в магнетроне и ускоряющем резонаторе записаны на основе первого закона Кирхгофа для узлов А и В. После применения символического метода, метода медленно меняющихся амплитуд, введения безразмерного времени и преобразований они примут вид

$$\begin{cases} \frac{dU_{1f}}{d\tau} + A_1 U_{1f} + \frac{dU_{1r}}{d\tau} + B_1 U_{1r} = 0, \\ \frac{dV_2}{d\tau} + A_2 V_2 = (A_2 - B_2) U_{2r}. \end{cases} \quad (1)$$

В (1) приняты следующие обозначения:

$$A_1 = \alpha_1 - G_{e1} + j(\Delta v_1 - B_{e1}),$$

$$\alpha_1 = 0.5(1/Q_{01} + 1/Q_{E1})\omega_{01}/\omega_s, \quad \Delta v_1 = \frac{\omega_{01}}{\omega_s} - 1,$$

$$B_1 = \gamma_1 - G_{e1} + j(\Delta v_1 - B_{e1}),$$

$$\gamma_1 = 0.5(1/Q_{01} - 1/Q_{E1})\omega_{01}/\omega_s,$$

$$A_2 = \alpha_2 + \sigma_2(\eta_{e2} + \frac{db_{e2}}{d\tau} + j(\Delta v_2 + b_{e2} - \frac{d\eta_{e2}}{d\tau})),$$

$$\alpha_2 = 0.5(1/Q_{02} + 1/Q_{E2})\omega_{02}/\omega_s, \quad \Delta v_2 = \frac{\omega_{02}}{\omega_s} - 1,$$

$$B_2 = \gamma_2 + \sigma_2(\eta_{e2} + \frac{db_e}{d\tau} + j(\Delta v_2 + b_{e2} - \frac{d\eta_{e2}}{d\tau})),$$

$$\gamma_2 = 0.5(1/Q_{02} - 1/Q_{E2})\omega_{02}/\omega_s, \quad \sigma_2 = 0.5/Q_{02},$$

где G_{e1}, B_{e1} – компоненты электронной проводимости магнетрона, η_{e2}, b_{e2} – компоненты относительной проводимости (мощности) пучка ускоренных электронов [2], ω_{01}, ω_{02} – резонансные частоты анодного блока магнетрона и резонатора, Q_{01}, Q_{02} – собственные добротности анодного блока магнетрона и ускоряющего резонатора, Q_{E1}, Q_{E2} – внешние добротности анодного блока магнетрона и ускоряющего резонатора, Q_{L1}, Q_{L2} – нагруженные добротности анодного блока и ускоряющего резонатора. Падающие и отраженные волны на выходах (входах) устройства связи анодного блока магнетрона и резонатора связаны соотношениями

$$\begin{cases} U_{2r} = S_{12} U_{1f}(\tau - \tau_{12}), \\ U_{2f} = V_2 - S_{12} U_{1r}(\tau - \tau_{21}), \\ U_{1r} = S_{21} U_{2f}(\tau - \tau_{21}). \end{cases} \quad (2)$$

в которых $S_{12} = S_{21} = S_{12} e^{j\theta_{12}}$ – коэффициент передачи устройства связи, $\tau_{12} = \tau_{21}$ – запаздывание в нем. Все векторы, входящие в систему (1) и соотношения (2), комплексные.



Для численного решения системы из уравнений выделяются действительные и мнимые части. Таким образом, колебания в моноблоке описываются системой из 4-х уравнений: два уравнения относительно медленно меняющихся амплитуд и два – относительно медленно меняющихся фаз колебаний. Если положить $\omega_s = \omega_{02}$, то величина $\frac{d\phi_1}{d\tau}$ будет показывать отклонение частоты колебаний от резонансной частоты ускоряющего резонатора, не нагруженного электронным пучком.

Установившиеся процессы в моноблоке магнетрон-ускоряющий резонатор микротрона были исследованы в [10, 11]. При $\theta_{12} \leq 6\pi$ в нем возможно существование колебаний с 3–5 частотами. Устойчивым состояниям соответствуют только три из них. Одна из этих частот близка к резонансной частоте ускоряющего резонатора. Ее будем называть основной, остальные дополнительные (паразитные). Дополнительные частоты соответствуют устойчивым состояниям анодного блока, нагруженного устройством связи при коротко замкнутом резонаторе. Для того чтобы понять, какое из этих состояний реализуется, и выяснить длительность процесса установления, необходимо исследование переходных процессов.

Для расчетов переходных процессов использовалась программа, которая интегрирует систему дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом методом Рунге–Кутты. ВЧ-напряжения нормируются на ВЧ-напряжение, соответствующее номинальной мощности магнетрона. Расчеты показали, что при длинах устройства связи 0.5–3 длины волны колебаний в системе возможно возбуждение колебаний на рабочей частоте. При этом к таким параметрам, как начальная расстройка анодного блока и ускоряющего резонатора, электрической длине устройства связи и затуханию в нем предъявляются достаточно жесткие требования. На рис. 2 представлены переходные процессы при коэффициенте передачи устройства связи $S_{12} = 0.75$ для нулевой начальной расстройки (рис. 2, *a*) и расстройки $-1/05$ полосы пропускания ре-

зонатора (рис. 2, *b*). На рис. 2, *a* видно, что при $\tau = 2000$ в системе устанавливаются колебания с частотой, близкой к резонансной ускоряющего резонатора $\left(\frac{d\phi_1}{d\tau} \approx 0.0006\right)$. При

$\tau = 2700$ устанавливается амплитуда колебаний в резонаторе, соответствующая существованию пучка ускоренных электронов. Его формирование вызывает возрастание резонансной частоты ускоряющего резонатора и частоты генерируемых колебаний. На рис. 2, *b* частота колебаний при $\tau \leq 2700$ ниже рабочей частоты $\left(\frac{d\phi_1}{d\tau} \leq -0.04\right)$. Частота, близкая к рабочей, устанавливается только при $\tau \approx 3100$. Длительность процесса установления колебаний в резонаторе увеличилась, импульс тока пучка задержан до $\tau \approx 3700$. На рис. 2, *b* частота колебаний менее эффективно следует (вверх) за резонансной частотой ускоряющего резонатора, нагруженного пучком. Величина тока пучка здесь тоже меньше (примерно на 14%). Дальнейшее увеличение начальной расстройки приводит к возбуждению колебаний на нижней дополнительной (паразитной) частоте.

Интервал начальных расстроек, в котором возбуждаются колебания на рабочей частоте, более протяженный в положительную сторону (в 2–3 раза). Это связано с тем, что выбег частоты магнетрона при переходных процессах происходит вниз. При $\omega_{01} \geq \omega_{02}$ создаются лучшие условия для захвата и удержания частоты генерируемых колебаний ускоряющим резонатором, чем при $\omega_{01} \leq \omega_{02}$. Увеличение коэффициента передачи устройства связи или его электрической длины ведет к уменьшению интервала начальных расстроек, в котором возбуждаются колебания на рабочей частоте. Зависимости ширины интервалов отклонений электрической длины устройства связи от целого числа полуволн и начальных расстроек от коэффициента передачи устройства связи были получены после анализа результатов расчетов переходных процессов. Такие зависимости для $\theta_{12} = 3\pi$ представлены на рис. 3. Уменьшение затухания в устройстве

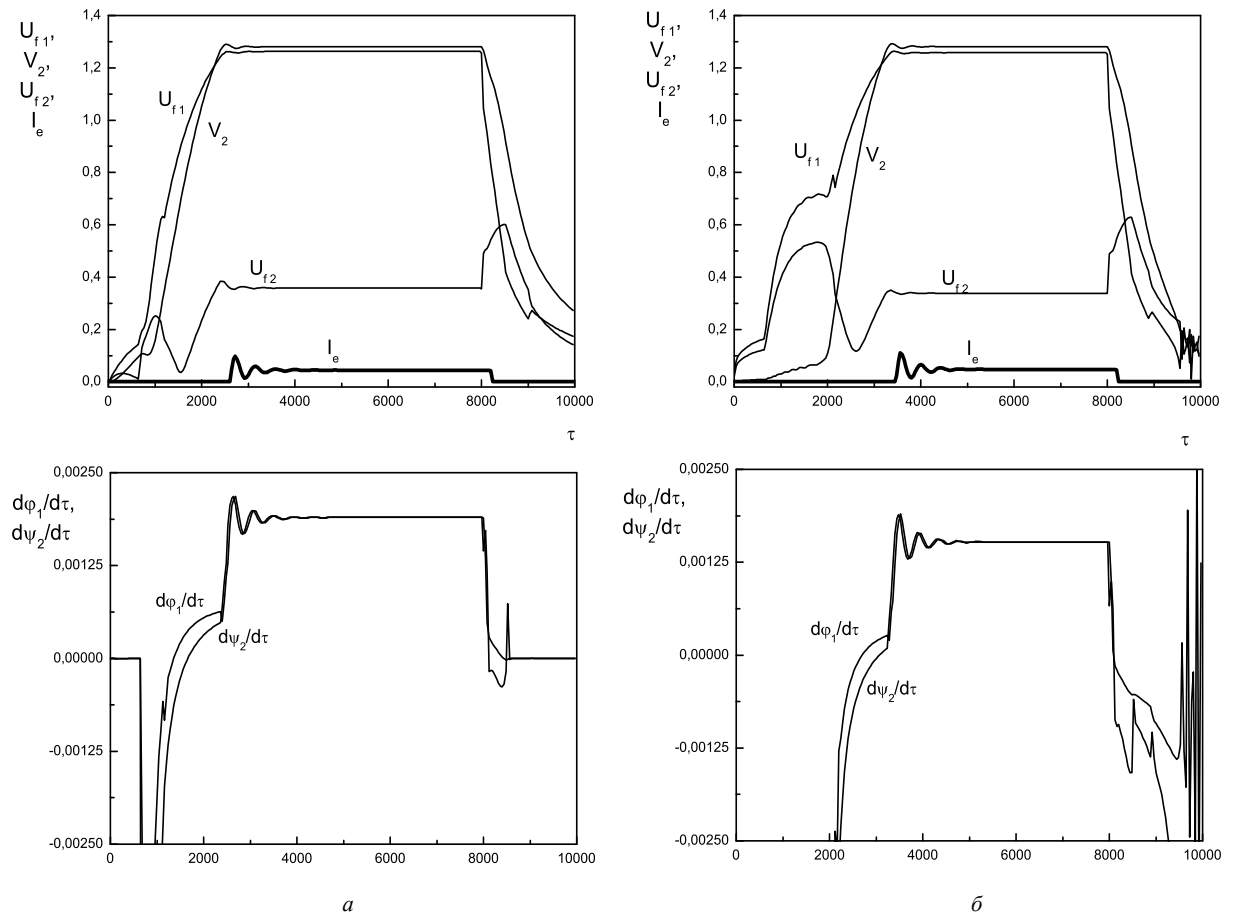


Рис. 2. Переходные процессы при двух значениях расстройки ускоряющего резонатора при $\theta_{12} = 2\pi$, $S_{12} = 0.75$: *a* – $\Delta f = 0$, *б* – $\Delta f = -1.05$ полосы пропускания. U_{f1} – амплитуда волны на выходе магнетрона; V_2 – амплитуда колебаний в ускоряющем резонаторе; U_{f2} – амплитуда волны, отраженной от резонатора; I_e – ток электронного пучка; $d\phi_1/d\tau$ – частота колебаний на выходе магнетрона; $d\psi_2/d\tau$ – частота колебаний в резонаторе

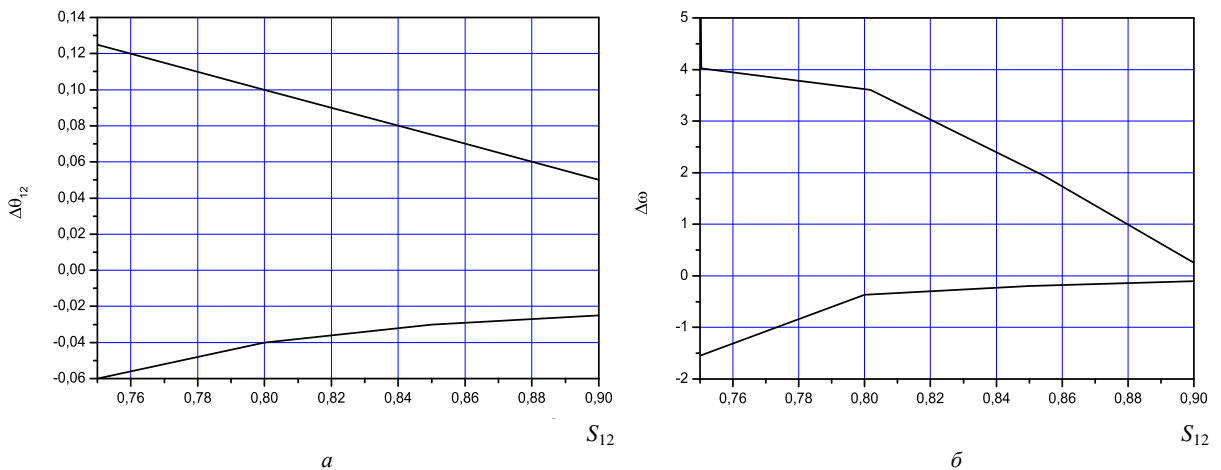


Рис. 3. Зависимости ширины области отклонений электрической длины устройства связи, в которой возбуждаются колебания на рабочей частоте при различных значениях от затухания в устройстве связи при $\theta_{12} = 3\pi$: *a* – от целого числа полу-волн; *б* – от начальных расстроек

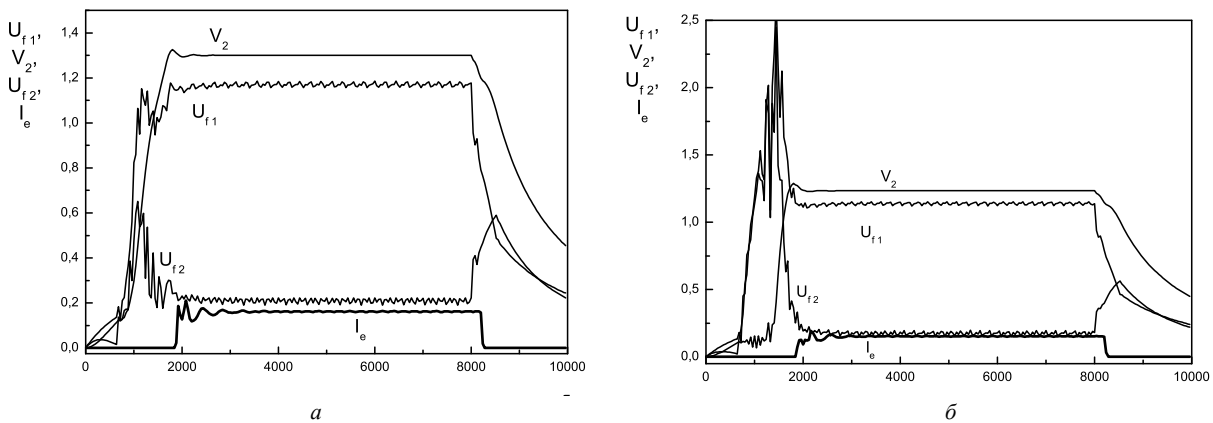


Рис. 4. Переходные процессы при различных значениях отношения нагруженной добротности ускоряющего резонатора к нагруженной добротности анодного блока магнетрона и $\Delta f = 0$. Обозначения см. на рис. 1, 2. $\theta_{12} = 2\pi$, $S_{12} = 0.9$ при величине отношения Q_{L2}/Q_{L1} : а – 8.5; б – 10

связи ведет к необходимости более точного совпадения резонансных частот анодного блока магнетрона и ускоряющего резонатора, а электрической длины устройства связи с целым числом полуволн. На рис. 4 показано влияние соотношения добротностей магнетрона и ускоряющего резонатора на переходные процессы в системе. При росте нагруженной добротности резонатора увеличивается его постоянная времени. Это приводит к большему времени установления колебаний в резонаторе, возрастанию амплитуды и длительности отражений от него на переднем фронте импульса. В этот временной интервал частота колебаний в системе близка к нижней дополнительной $\left(\frac{d\varphi_1}{d\tau} \approx -0.06 \right)$, а амплитуда колебаний в магнетроне возрастает.

Таким образом, создаются благоприятные условия для установления колебаний с нижней дополнительной частотой, перенапряжений и пробоев в магнетроне. При отношении нагруженных добротностей ускоряющего резонатора и магнетрона, превышающем 10, и $\theta_{12} = 2\pi$ в моноблоке возбуждаются и устанавливаются колебания на дополнительных частотах, преимущественно на нижней. Увеличение θ_{12} затрудняет возбуждение колебаний на рабочей частоте, облегчает возбуждение на дополнительных частотах и приводит к необходимости еще большего снижения нагруженной добротности ускоряющего резонатора.

На основе вышеизложенного и результатов, полученных в [12], могут быть сделаны следующие выводы.

1. Для возбуждения колебаний на частоте, близкой к резонансной частоте ускоряющего резонатора, необходимо обеспечить начальную расстройку анодного блока магнетрона и ускоряющего резонатора, зависящую от потерь в устройстве связи. Электрическая длина устройства связи должна быть равна целому числу полуволн. Допустимые отклонения от него также зависят от потерь в устройстве связи. Такие зависимости для длины устройства связи 1.5λ ($\theta_{12} = 3\pi$) показаны на рис. 3. При невыполнении этих требований возбуждаются колебания с дополнительными частотами, что ведет к перенапряжениям и, по-видимому, к пробоям в магнетроне.

2. Потери мощности в устройстве связи должны быть не менее 10%, а его длина не более 1.5λ . Увеличение потерь облегчает возбуждение колебаний с рабочей частотой и снижает требования к начальной расстройке и отклонению электрической длины устройства связи от целого числа полуволн.

3. Для устойчивого возбуждения колебаний на рабочей частоте величина отношения нагруженной добротности ускоряющего резонатора к нагруженной добротности магнетрона должна быть не более 10 при длине устройства связи не более λ . При увеличении длины устройства связи отношение доб-



ротностей должно быть уменьшено. При возбуждении колебаний на рабочей частоте и величине тока инжекции, близкой к оптимальной, в резонаторе устанавливается амплитуда колебаний, соответствующая режиму ускорения, и формируется электронный пучок, которому передается мощность.

Магнитная система

Величина индукции ведущего магнитного поля микротрона трехсантиметрового диапазона (для режима с приростом 0.31 энергии покоя электрона [4]) в 3 раза меньше рабочих значений поля серийных магнетронов. Оно не может использоваться как рабочее для серийного магнетрона. Увеличение ведущего магнитного поля (при увеличении прироста энергии) ограничивается недостаточной электрической прочностью ускоряющего резонатора. Поэтому анодный блок магнетрона целесообразно разместить за внешней стенкой обратного магнитопровода и связать с резонатором устройством связи, длина которого соизмерима с длиной волны колебаний.

С помощью программы Poisson [13] были проведены расчеты магнитной системы микротрона на основе постоянных магнитов [14, 15], выполненных из редкоземельных материалов (например, Nd-Fe-B), обладающих остаточной индукцией до 1.41 Т. Основные параметры магнитной системы на постоянных магнитах соответствуют параметрам электромагнита микротрона, созданного в СГУ [16]. Межполюсный зазор 32 мм, диаметр полюса 220 мм, рабочее значение индукции магнитного поля 0.21 Тл. При расчетах контролировалась неоднородность поля, приемлемой считалась величина, не превышающая 0.22%, полученная в электромагните микротрона [16]. Магнитная система состоит из двух симметричных относительно медианной плоскости частей. Одна такая часть показана на рис. 5. Основными ее элементами являются: магнитопровод, два полюса, два полюсных магнита и два кольцевых магнита (охватывающих полюса). Кольцевые магниты необходимы для усиления магнитного поля и предотвращения замыкания магнитных силовых линий с полюса на

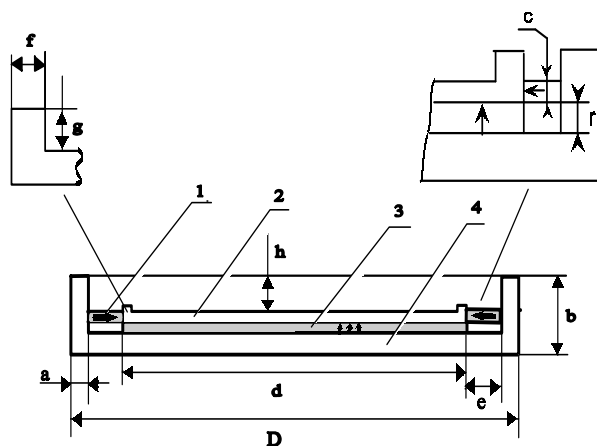


Рис. 5. Магнитная система микротрона на постоянном магните: 1 – кольцевой магнит, 2 – полюс, 3 – основной магнит, 4 – магнитопровод

внутреннюю поверхность обратного магнитопровода. Если считать, что полюса параллельны, то неоднородность поля определяется в основном магнитным сопротивлением полюсов, однородностью намагниченности магнитных элементов и краевыми эффектами на полюсе [2]. Для компенсации рассеяния и увеличения области однородного поля использованы кольцевые краевые шиммы, размеры которых постоянно варьировались для получения максимально возможной однородности поля. Ширина кольцевых магнитов тоже варьировалась при расчетах.

Некоторые результаты оптимизации магнитной системы представлены на рис. 6. Видно, что, начиная с определенного значения ($e = 0.8$ см), уменьшение параметра e ведет к сильному возрастанию неоднородности поля. Увеличение этого параметра (сверх 0.8 см) не приводит к значительному повышению однородности поля. Ширина кольцевых магнитов влияет и на массу магнитной системы. При ее уменьшении падает напряженность поля в рабочем зазоре и необходимо увеличение толщины полюсных магнитов. Зависимость массы магнитной системы от ширины кольцевых магнитов также представлена на рис. 6. При оптимальных параметрах системы неоднородность поля не превышает 0.08%. Толщина полюсного магнита при этом 0.0055 м. Некоторые результаты расчетов представлены в таблице. Расчетное распределение поля вдоль главного диаметра исследуемой системы представлено на



рис. 2, там же показано аналогичное распределение в электромагните микротрона [16]]. В электромагните поле возрастает к краю полюса, а в исследуемой системе медленно убывает. Такое распределение поля способствует увеличению захвата электронов в ускорение [2] и повышению эффективности микротрона.

Масса электромагнита микротрона [16] равна 38 кг, а неоднородность поля 0.22%. Такая величина неоднородности вполне приемлема.

Расчетное значение неоднородности поля в электромагните хорошо совпадает с измеренным. Из таблицы видно, что оптимальным является вариант 8, но шимма для этого случая должна быть сделана с особой точностью.

Результаты расчета магнитной системы

Номер варианта	e , см	f , см	g , см	Неоднородность, %
1	1	0.5	0.1	0.9
2	1	0.5	0.15	1
3	1	0.5	0.2	0.2
4	1	0.5	0.2	12
5	2	0.5	0.1	5
6	2	0.5	0.15	0.28
7	2	0.5	0.18	0.09
8	2	0.5	0.185	0.08
9	2	0.3	0.185	0.3
10	2	0.1	0.185	1
11	2	0.5	0.19	0.9
12	2	0.5	0.2	0.95
Электромагнит	–	–	–	0.22

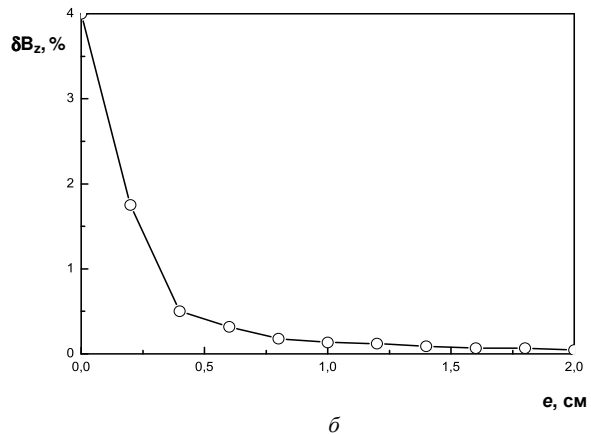
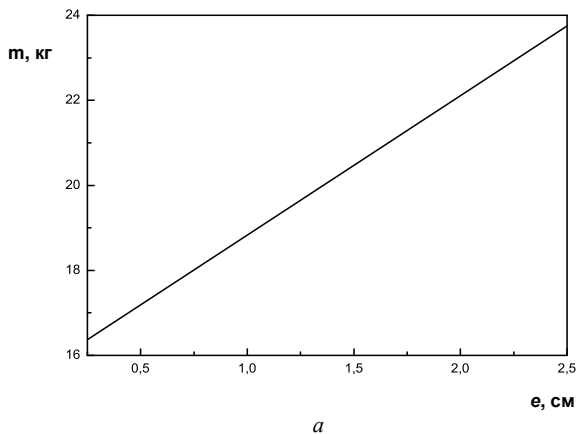


Рис. 6. Зависимость массы магнитной системы m (а) и неоднородности магнитного поля δB_z (б) в рабочей области от ширины кольцевых магнитов e

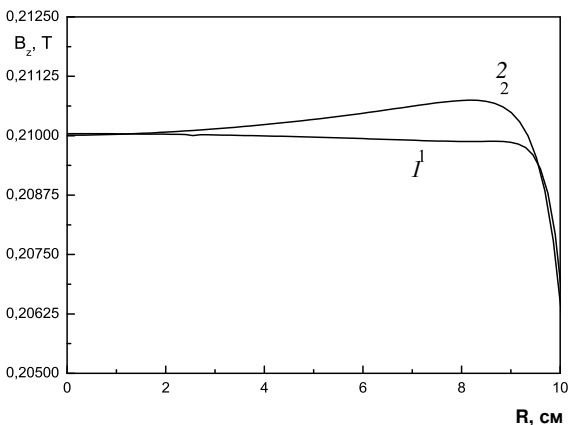


Рис. 7. Распределение индукции магнитного поля вдоль главного диаметра магнитной системы: 1 – магнитная система на постоянных магнитах, 2 – электромагнит микротрона [16]

Вариант 4 (нулевое намагничивание кольцевого магнита) дает самую высокую неоднородность поля и достаточно большой вес системы. Это говорит о необходимости применения кольцевого магнита. Расчеты дали следующие размеры магнитной системы: $a = 10$ мм, $b = 35$ мм, $c = 5$ мм, $d = 220$ мм, $D = 280$ мм, $e = 20$ мм, $f = 5$ мм, $g = 1.85$ мм, $h = 16$ мм. Вес магнитной системы равен 20 кг. Полученные данные показывают целесообразность применения в малогабаритном микротроне магнитной системы на основе постоянных магнитов.



Заключение

Создание объединенной СВЧ-системы и магнитной системы на основе постоянных магнитов позволит уменьшить вес, размеры и стоимость трехсантиметрового микротрона. Моноблок магнетрон-ускоряющий резонатор предполагается создать на основе магнетрона МИ-505. Это позволит уменьшить объем излучающего блока трехсантиметрового диапазона микротрона с энергией 5 МэВ более чем в три раза. Например, у микротрона [16] размеры излучающего блока уменьшатся с $845 \times 420 \times 552$ до $420 \times 420 \times 320$ мм³. При этом повысятся электрическая прочность и надежность СВЧ-системы, упростится управление ускорителем и его обслуживание.

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

Библиографический список

1. Векслер В.И. Новый метод ускорения релятивистских частиц // Докл. АН СССР. 1944. Т.43. С.346.
2. Катица С.П., Мелехин В.Н. Микротрон. М.: Наука, 1969. 210 с.
3. Мелехин В.Н. Эффективные режимы микротрона // Электроника больших мощностей. М.: Наука, 1968. №5. С.228–237.
4. Родионов Ф.В., Степанчук В.П. Об одном режиме ускорения в микротроне // ЖТФ. 1971. Т.41, №5. С.999–1001.
5. Алексеев И.В., Балаев А.Ю., Горбачев В.П., Степанчук В.П. Развитие микротронного направления в Саратовском университете // Проблемы современной физики / ОИЯИ. Дубна, 2000. С.22–31.
6. Shvedunov V.I., Barday R.A., Gorbachev V.P. et al. A Race-Track Microtron with High Brightness Beams // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2004. Vol.531, №3. P.346–366.
7. Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Gribov I.V. et al. A 70 MeV Race-Track Microtron // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2005. Vol.550, №1–2. P.39–53.
8. Косарев Е.Л. Процессы установления и предельный ток в микротроне // ЖТФ. 1972. Т. XLII, вып.10. С.2239–2246.
9. Заворотыло В.Н., Милованов О.С. Модель магнетронного генератора для расчета переходных процессов // Ускорители. М.: Атомиздат, 1977. №16. С.34–37.
10. Бондусь А.А., Горбачев В.П., Степанчук В.П. СВЧ-система малогабаритного микротрона // The Thirteenth Intern. Workshop Beam Dynamics & Optimization: Program and Abstracts. Saint-Petersburg, 2006. P.28.
11. Бондусь А.А., Горбачев В.П., Степанчук В.П. Совмещенная СВЧ система микротрона // The Fourteenth Intern. Workshop Beam Dynamics & Optimization. Saint-Petersburg, 2007. P.13.
12. Бондусь А.А., Горбачев В.П., Степанчук В.П. Переходные процессы в моноблоке магнетрон-ускоряющий резонатор микротрона // Вестн. СПбГУ. Сер.10. 2008. №3.
13. Billen I.H., Young L.M. POISSON SUPERFISH Documentation, LA-UR-96-1834. Los-Alamos, 1996.
14. Максимов Р.В., Степанчук В.П., Шведун В.И. Магнит малогабаритного микротрона // The Thirteenth Intern. Workshop Beam Dynamics & Optimization: Program and Abstracts. Saint-Petersburg, 2006. P.41.
15. Максимов Р.В., Мутасов Д.В., Степанчук В.П. Магнитная система моноблока магнетрон-ускоряющий резонатор микротрона // The Fourteenth Intern. Workshop Beam Dynamics & Optimization: Program and Abstracts. Saint-Petersburg, 2007. P.32.
16. Бондусь А.А., Горбачев В.П., Степанчук В.П. Малогабаритный микротрон трехсантиметрового диапазона для дефектоскопии // Сб. докл. 11-го междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб., 2005. С.19–22.