

# Исследование влияния увеличения электронной нагрузки на процесс ускорения в микротроне с автогенераторной СВЧ-системой

И.В.Алексеев, В.П.Горбачев, В.П.Степанчук

Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского, Россия

E-mail: serg@sgu.ssu.runnet.ru

До настоящего времени установившиеся процессы в микротронах с автогенераторной СВЧ-системой исследованы при величине относительной проводимости пучка ускоренных электронов, не превышающей 2 [1]. Пучок электронов со всех орбит — нелинейная нагрузка ускоряющего резонатора с запаздывающей реакцией на изменения амплитуды поля в нем. Ее увеличение может привести к качественным изменениям процесса ускорения и характера колебательных процессов в автогенераторной СВЧ-системе. Результаты расчетов [2] свидетельствуют о возможности существования режима автомодуляции тока пучка ускоренных электронов в микротроне с автогенераторными системами СВЧ-питания на основе амплитрона. В настоящем докладе изложены результаты численного моделирования установившихся процессов в микротроне с автогенераторной СВЧ-системой.

В автогенераторных системах амплитрон охвачен цепью положительной обратной связи, которая включает в себя ускоряющий резонатор и согласующие элементы. Классическая автогенераторная система схематически показана на рис.1. Более подробно такая система и конструкция микротрона, на котором планируются экспериментальные исследования, рассмотрены в [3]. Для описания колебательных процессов в автогенераторных системах использовались модельные представления, аналогичные [2].

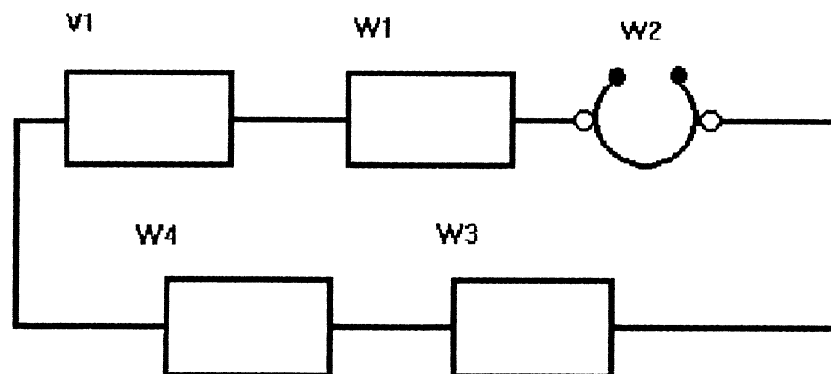


Рис. 1: Схема автогенераторной СВЧ-системы микротрона. V1 — амплитрон; W1, W2 — ферритовые “развязки”; W2 — ускоряющий резонатор с двумя элементами связи; W3 — фазовращатель.

Резонатор с двумя элементами связи представлялся одиночным контуром, который связан с двумя длинными линиями и нагружен током пучка ускоренных электронов. Учитывалось взаимодействие пучка и резонатора только на первой гармонике. Амплитрон рассматривался как 4-полюсник с заданной амплитудной характеристикой. Ее вид соответствует питанию амплитрона от модулятора с формирующей линией [4]. СВЧ-тракт, включающий в себя циркуляторы, фазовращатель и другие элементы, описывался матрицами рассеяния и временами запаздывания, соответствующими их элементам. Эти модельные представления позволили получить систему дифференциальных уравнений колебательных процессов в автогенераторной системе СВЧ-питания микротрона. Ее порядок понижен с помощью метода медленно меняющихся амплитуд.

$$\begin{cases} \frac{dV}{d\tau} + (\alpha + G_e)V - [CV(\tau - \tau_1) - DU(\tau - \tau_1)]\cos(\Psi(\tau - \tau_1) - \theta_1) - \Psi = 0, \\ \frac{d\Psi}{s\tau} + \Delta\nu + B_e - [C\frac{V(\tau - \tau_1)}{V} + D\frac{U(\tau - \tau_1)}{V}]\sin(\Psi(\tau - \tau_1) - \theta_1 - \Psi) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = 0, 5\omega_0(\beta_1 + \beta_2 + 1)/\omega_s Q_0, \quad \Delta\nu = 1 - \omega_0/\omega_s, \quad \tau = \omega_s t.$$

Здесь  $S, D$  — постоянные коэффициенты, определяемые параметрами резонатора и потерями в элементах СВЧ-тракта;  $V$  — медленно меняющаяся нормированная амплитуда СВЧ-напряжения на ускоряющем зазоре резонатора;  $U$  — медленно меняющаяся нормированная амплитуда напряжения наводимого в замедляющей системе амплитрона его электронным потоком;  $\Psi$  — медленно меняющаяся фаза колебаний в резонаторе;  $\theta_1$  — электрическая длина кольца волноводного тракта автогенератора;  $\tau_1$  — суммарное запаздывание в нем;  $\omega_0, \omega_s$  — резонансная частота ускоряющего резонатора и частота установившихся колебаний в системе;  $Q_0$  — собственная добротность ускоряющего резонатора;  $\beta_1, \beta_2$  — его коэффициенты связи с входным и выходным волноводами;  $G_e, B_e$  — активная и реактивная проводимости электронного пучка.

Электронная нагрузка ускоряющего резонатора здесь описывалась предложенной в [5] моделью микротронного пучка с запаздыванием “релейного” типа. Для более точного описания вклада первых орбит в реакцию пучка на изменения амплитуды колебаний в резонаторе орбиты микротрона (предполагалось что их 20) были поделены на три группы: “ближние” — с 1-й по 6-ю, “средние” — с 7-й по 12-ю и “дальние” — с 13-й по 20-ю. Величина электронной нагрузки распределяется между ними в соответствии с кривой распределения тока по орбитам. Относительная проводимость пучка примет вид

$$\eta_e - \eta_{e1}(V(\tau - \tau_{e1})) + \eta_{e2}(V(\tau - \tau_{e2})) + \eta_{e3}(V(\tau - \tau_{e3})), \quad (2)$$

где  $\tau_{e1}, \tau_{e2}, \tau_{e3}$  — времена пролета электронов до 6-, 12- и 20-й орбит. Активная и реактивная электронные проводимости могут быть выражены

$$G_e = (\eta_e + \eta_k + \frac{d(\eta_e \tan(\varphi_e))}{d\tau})/2Q_0; \quad B_e = (\eta_e \tan(\varphi_e) + \frac{d\eta_k}{d\tau})/2Q_0, \quad (3)$$

где  $\eta_e, \eta_k$  — относительные активные проводимости пучка ускоренных электронов и катодного пучка;  $\varphi_e$  — фазовый сдвиг между ускоряющим напряжением и первой гармоникой тока пучка. В [5] полагается, что он устанавливается мгновенно.

В дальнейшем рассматриваются стационарные колебания. В работе [2] рассматривались малые отклонения амплитуды колебаний от ее стационарного значения. При этом полагалось, что частота колебаний равна резонансной частоте резонатора. Система (1) была линеаризована и проведен анализ знаков действительных частей корней ее характеристического уравнения. В настоящей работе изложены результаты численного интегрирования системы (1) с учетом (2) и (3). Оно проводилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Начальные условия — параметры установившегося режима, определенные в [2]. Для имитации возмущающего воздействия, начальные условия задавались отличными от тех, что следует из решения системы (1). Реакция на них может быть аperiодической или колебательной.

В отличие от [2] мы получили, что при  $\tau_1 \leq \tau_{ze}$  и  $\eta_e \leq 10$  колебательные возмущения всегда затухают. Это является результатом учета вклада в нагрузку резонатора пучка катодных электронов, а также влияния непостоянства частоты колебаний. Однако скорость затухания убывает при возрастании коэффициента обратной связи, что находится в качественном соответствии с результатами [2]. Там было получено снижение пороговых значений  $\eta_e$  (превышение которых делает колебательные возмущения нарастающими) с ростом коэффициента обратной связи. Это связано с тем, что выходная мощность амплитрона —

сумма входной мощности и мощности, генерируемой его электронным потоком. Последняя слабо зависит от величины входной мощности. Возрастание коэффициента приводит к усилению воздействия пучка самого на себя по цепи запаздывающей обратной связи. Обычно величина коэффициента обратной связи выбирается в диапазоне 0,15–0,25. Ее увеличение ведет к возрастанию энергии, накопленной в кольце обратной связи, и увеличению потерь в элементах волноводного тракта. Глубина затухающей модуляции амплитуды колебаний недостаточна для срыва режима ускорения. Естественно, что она сопровождается и узкополосной частотной модуляцией.

При увеличении времени запаздывания до  $\tau_1 = \tau_{e3}$  также отмечается снижение скорости затухания периодических возмущений. По-видимому, это связано с несовершенством используемой модели пучка. Дальнейшее увеличение  $\tau_1$  приводит к возникновению амплитудной (и частотной тоже) автомодуляции с периодом  $\tau_{a1}$ , что является естественным для автогенераторов с запаздывающей обратной связью [6]. При этом ток “дальних” орбит может спадать до нуля.

Зависимости тока “дальних” орбит и частоты колебаний в системе от времени приведены на рис.2, 3. На рис.4 показана затухающая амплитудная модуляция тока пучка, переходящая затем в незатухающую. Последняя имеет другой период и существенно меньшую глубину. Эта кривая рассчитана при  $\tau_1 = 400$ . Здесь следует отметить, что в волноводных трактах микротронов величина запаздывания не превышает 100–200 периодов СВЧ-колебаний. В [3] ее также невозможно реализовать.

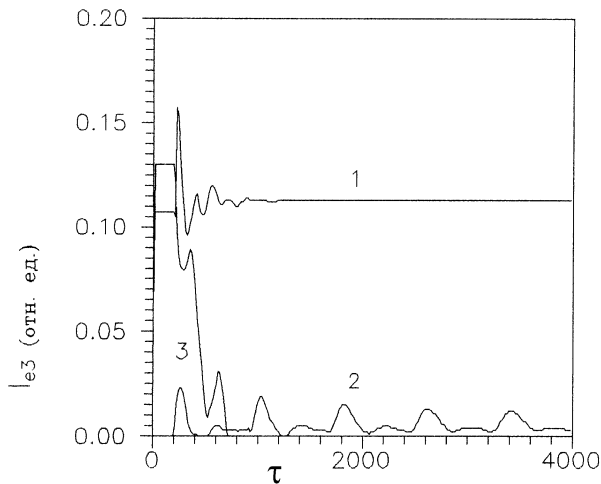


Рис. 2: Реакция тока пучка на возмущающие воздействия. Кривая 1 —  $\varphi_s = 0,15$ ;  $K_f = 0,25$ ;  $\tau_1 = 60$ ;  $\eta_e = 10$ . Кривая 2 —  $\varphi_s = 0,15$ ;  $K_f = 0,4$ ;  $\tau_1 = 700$ ;  $\eta_e = 8$ . Кривая 3 —  $\varphi_s = 0,25$ ;  $K_f = 0,4$ ;  $\tau_1 = 100$ ;  $\eta_e = 10$ .

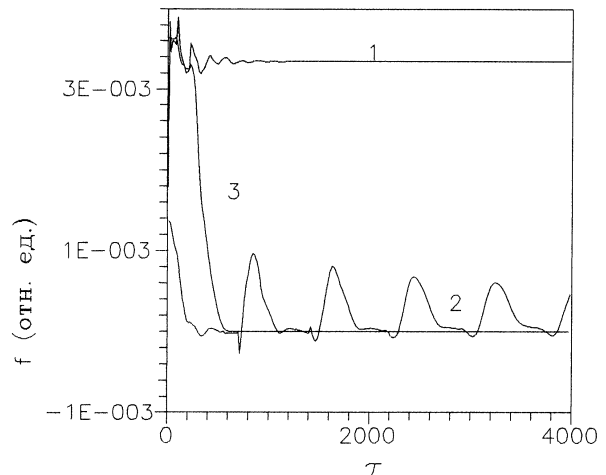
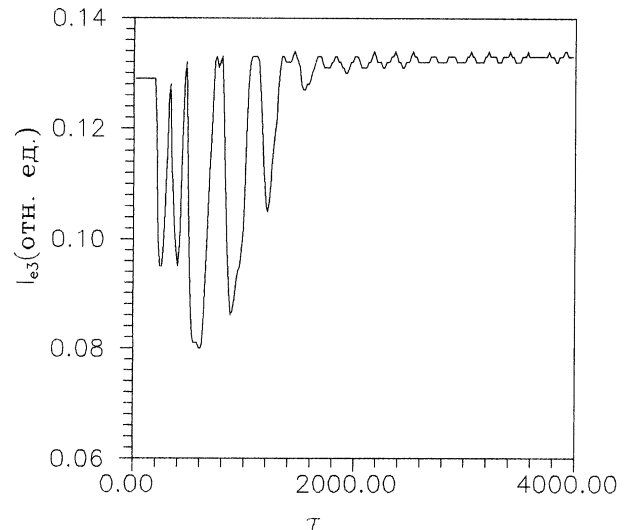


Рис. 3: Зависимости частоты колебаний в системе от времени. Кривая 1 —  $\varphi_s = 0,15$ ;  $K_f = 0,25$ ;  $\tau_1 = 60$ . Кривая 2 —  $\varphi_s = 0,15$ ;  $K_f = 0,4$ ;  $\tau_1 = 700$ . Кривая 3 —  $\varphi_s = 0,25$ ;  $K_f = 0,4$ ;  $\tau_1 = 100$ .

Апериодические возмущения амплитуды колебаний израстают вплоть до срыва ускорения уже при  $\eta_e = 3 - 4$ , если  $\varphi_s \geq 0,3$ . При этом в автогенераторной системе резко возрастает амплитуда колебаний. Это связано с тем, что при наличии пучка стационарная амплитуда определяется нелинейностью резонатора. Амплитуда же колебаний без пучка ограничивается более слабой нелинейностью амплитрона. Зависимости тока “дальних” орбит времени при этом также показаны на рис.2, 3 (кривые 3).

Таким образом, увеличение электронной нагрузки в микротроне с автогенераторной СВЧ-системой приводит к уменьшению области равновесных фаз до 0,3 радиан уже при  $\eta_e = 4$ . Эта величина существенно ниже порога сильноточной неустойчивости [7].

Рис. 4: Реакция тока пучка на возмущающие воздействия.  $\varphi_s = 0,2$ ;  $K_f = 0,4$ ;  $\tau_1 = 410$ ,  $\eta_e = 8$ .



Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 96-02-16360А).

### Список литературы

- [1] Алексеев И.В., Владимиров Н.В., Горбачев В.П., Степанчук В.П., Соловьев А.В. — В сб.: Труды восьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна. ОИЯИ. 1983. Т2. С. 41-43.
- [2] Gorbachev V.P., Stepanchuk V.P. On the Automodulation of the Beam Current in Microtron with Autogenerative Microwave System at the Amplitron. — In: Proc. of Forth Intern. Workshop Beam Dynamics & Optimization. 13–17 Oct. 1997, JINR. Dubna. 1998.
- [3] Alekseev I.V., Gorbachev V.P. Stepanchuk V.P. Microtron with Autogenerative Microwave Supply System on the Base of Amplitron — In: Proced. of Forth Intern. Workshop Beam Dynamics & Optimization. 13–17 Oct. 1997, JINR. Dubna. 1998.
- [4] Цейтлин М.Б., Фурсаев М.А., Бецкий О.В. Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями. — М.: Сов. радио, 1978, 280 с.
- [5] Косарев Е.Л. // ЖТФ. 1972, Т. XLII вып. 10, с. 2239–2246.
- [6] Кузнецов С.П. // Известия Вузов. Радиофизика. № 12, 1982, т. XXV, с. 1410–1427.
- [7] Мелехин В.Н., Луганский Л.Б. // ЖТФ. 1970, вып. 11, с. 2465–2467.