

УДК 621.384.644.3

АВТОМОДУЛЯЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУППИРУЮЩЕЙ СЕКЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С КОЛЬЦОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ. I

В. А. Ажиппо, Н. И. Айзацкий, Г. М. Иванов, Л. А. Махненко

Изложены результаты экспериментальных исследований автомодуляционных процессов в группирующей секции универсального инжекторного комплекса ускорителя ЛУЭ-300 ХФТИ АН УССР. Отличительной особенностью этого инжекторного комплекса является использование в системе высокочастотного питания рекуперации высокочастотной мощности, осуществляемой регулируемым кольцами обратной связи. При ускорении интенсивных пучков в инжекторной секции обнаружены автомодуляционные явления, приводящие к дополнительной модуляции параметров пучка.

Процессы, лежащие в основе ускорения заряженных частиц в линейных резонансных ускорителях и усиления (генерации) высокочастотных колебаний электронными пучками, основываются на одних и тех же фундаментальных принципах. Поэтому целый ряд явлений, возникающих в высокочастотных электронных приборах (см. [1, 2] и цитированную там литературу), может при определенных условиях иметь место и в линейных электронных ускорителях. В частности, в ускорителях, содержащих в высокочастотной системе обратные связи для повышения эффективности использования СВЧ энергии [3-5], при определенных значениях ускоряемых токов и параметров обратной связи должны возникать автомодуляционные процессы, приводящие к дополнительной модуляции параметров ускоренного пучка. С одной стороны, на ускорителях, предназначенных для решения традиционных задач ядерной физики, такие режимы, приводящие к ухудшению заданных параметров пучка, требуют детального исследования в основном с целью максимального подавления данного явления, как это было, например, с поперечной неустойчивостью пучка. С другой стороны, модулированные на нескольких частотах пучки могут быть использованы в различных областях фундаментальной и прикладной физики, в частности при изучении коллективных явлений в материальных средах.

В данной работе изложены результаты экспериментальных исследований автомодуляционных процессов в группирующей секции универсального инжекторного комплекса ускорителя ЛУЭ-300 ХФТИ АН УССР.

1. Описание экспериментальной установки

В ходе реконструкции линейного ускорителя электронов на 300 МэВ (ЛУЭ-300) ХФТИ АН УССР был создан и в 1983 г. запущен универсальный инжекторный комплекс (УИК), предназначенный для формирования и ускорения как длинноимпульсных ($\tau \sim 2$ нс), так и короткоимпульсных ($\tau \sim 3$ пс) электронных пучков. Отличительной особенностью этого ускорителя является то, что каждая из его четырех секций, в том числе и группирующая, имеет кольцо обратной связи, необходимое для увеличения запасенной СВЧ энергии при работе в короткоимпульсном режиме.

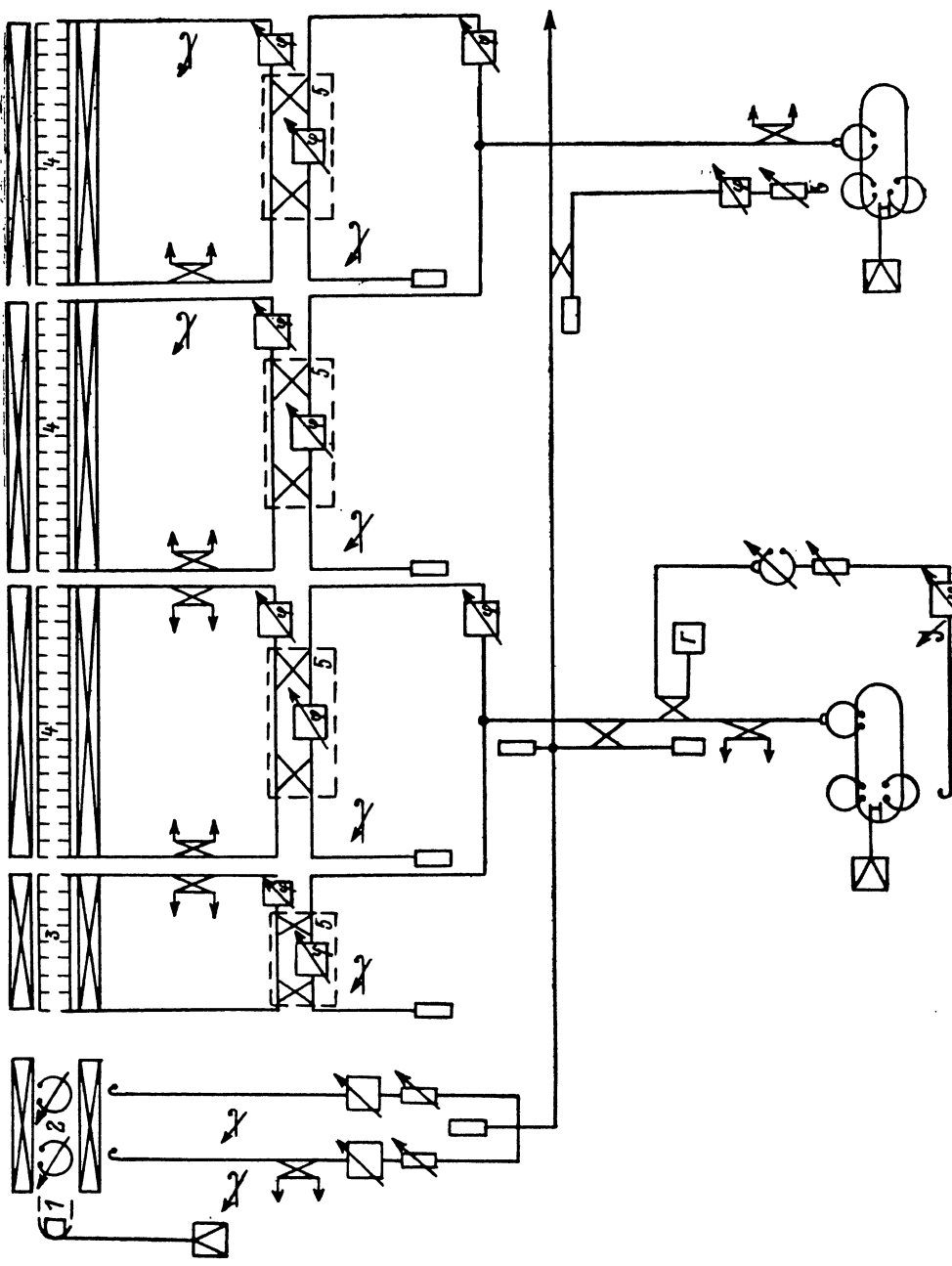


Рис. 1.

Схема УИК представлена на рис. 1. В качестве источника электронов применена трехэлектродная пушка 1, в которой используется инпрегнированный катод диаметром 20 мм. Пушка обеспечивает импульсный ток до 5 А в микросекундном и до 50 А в наносекундном режимах с энергией электронов до 180 кэВ. Предгруппирователь 2 состоит из двух тороидальных резонаторов, каждый из которых запитывается от источника мощности через направленный ответвитель на 14.7 дБ и два двойных T -образных моста импульсной мощностью до 100 кВт.

Длина группирующей секции 3 $L_1=83$ см, ускоряющих 4 $L_2=172$ см. С целью улучшения условий захвата пучка в процесс ускорения фазовая скорость волны в группирующей секции понижена до 0.97 с путем ее нагрева до $t=110$ °С. Для подавления возбуждаемой пучком поперечной аксиально-несимметричной волны во всех секциях произведены разрезы диафрагм. В каждом кольце установлены фазовращатель для настройки кольца в резонанс и коаксиальные направленные ответвители для индикации высокочастотного сигнала. Две секции попарно через двойной T -образный мост запитываются от одного высокочастотного источника мощности. Особенностью запитки колец является применение направленного ответвителя с переменной связью 5, позволяющего устанавливать оптимальную связь для передачи высокочастотной мощности в кольцо [³⁻⁵]. Предгруппирователь и ускоряющие секции помещены в соленоиды, обеспечивающие ведущее магнитное поле до 0.25 Тл.

В качестве источника высокочастотного питания первых двух секций использован клистрон типа КИУ-53, третьей и четвертой секций — клистрон КИУ-12А. Первый клистрон может работать в режиме автогенератора или запитываться от задающего генератора основной части ускорителя ЛУЭ-300.

2. Результаты экспериментальных исследований

Исследования возможности осуществления автомодуляционного режима ускорения были проведены на группирующей секции УИК. На вход направленного ответвителя этой секции поступала постоянная мощность $P \sim 6$ МВт. Высокочастотный сигнал с выхода через направленный коаксиальный ответви-

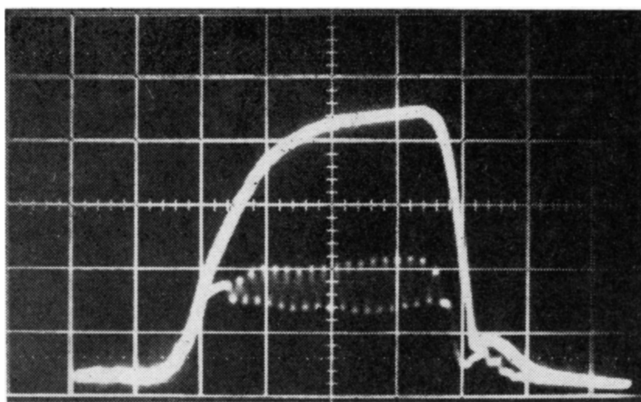


Рис. 2.

тель подавался на детектор (6ДЗД), а затем на вход осциллографа. Источник электронов обеспечивал ток порядка 2—3 А. Попадая в предгруппирователь, электронный пучок модулировался по плотности и увеличивал свою энергию,¹ а затем ускорялся в группирующей секции. На рис. 2 изображены осциллограммы огибающей высокочастотного импульса на выходе секции без пучка

¹ В работе представлены результаты исследования процесса ускорения предварительно сгруппированного пучка. Случай инжекции немодулированного пучка будет рассмотрен отдельно.

(верхняя) и с пучком (нижняя) для случая настройки кольца в резонанс (набег фазы волны вдоль системы кретен 2π) при оптимальном значении коэффициента передачи направленного ответвителя ($\mu \approx 0.42$) [3. 4]. Цена деления по

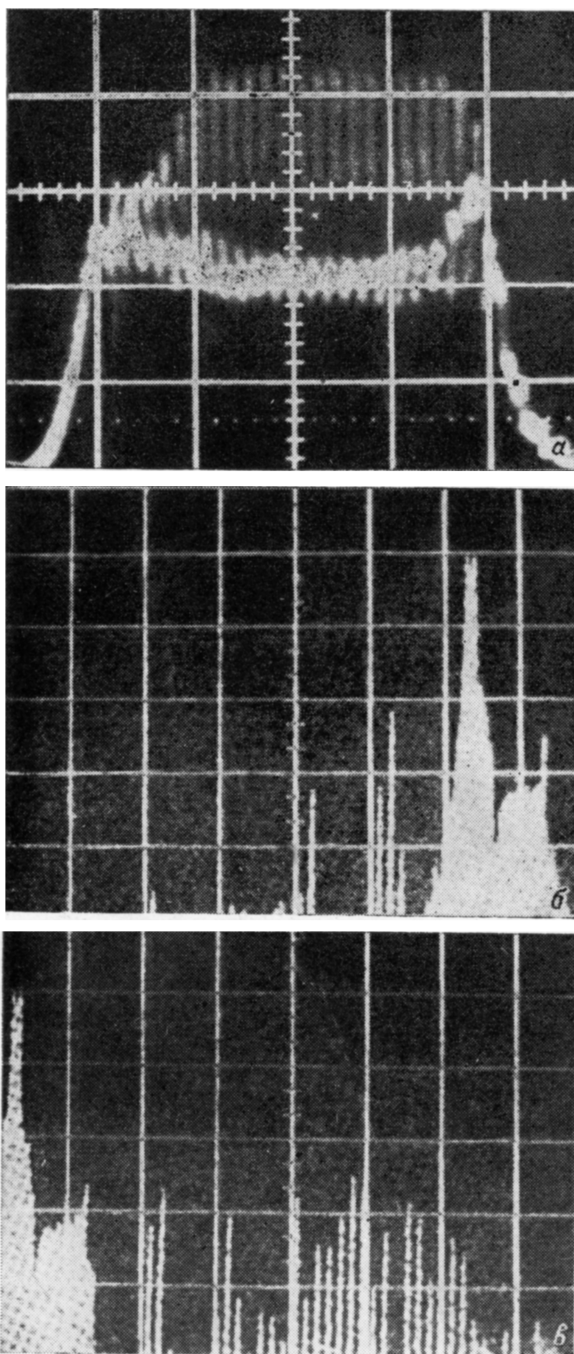


Рис. 3.

горизонтали для всех приводимых осциллограмм $\Delta t = 0.5$ мкс. Видно, что за счет токовой подгрузки амплитуда сигнала на выходе уменьшилась и появилась автомодуляция сигнала. Частота модуляции порядка 10 МГц, что совпадает с оценкой времени однократного пробега энергии по системе. При умень-

пени инжектируемого тока амплитуда колебаний падала, и при некотором пороговом значении автомодуляция срывалась.

Автомодуляционный режим ускорения с частотой $f \sim 10$ МГц наиболее легко реализовать при введении положительного сдвига фазы $\Delta\Phi \sim \pi/2$ в кольце обратной связи (рис. 3, а), поскольку пороговый ток возникновения неустойчивости в этом случае оказывается минимальным. При этом коэффициент модуляции $M = \Delta A / \bar{A}$ (\bar{A} — среднее значение амплитуды, ΔA — амплитуда колебаний) может превышать значение 0.5. При отрицательном сдвиге фазы в кольце обратной связи после переходных процессов возникает сложная автомодуляция с характерной частотой $f \sim 50$ МГц, что иллюстрируется осциллограммой огибающей сигнала (рис. 4; $\Delta\Phi \sim -\pi/2$). Размытие сигнала на задней половине импульса и представляет описываемый колебательный процесс.

С помощью спектра-анализатора С4-60 были проведены измерения спектров полного сигнала. Для сигнала, огибающая которого представлена на рис. 3, а;

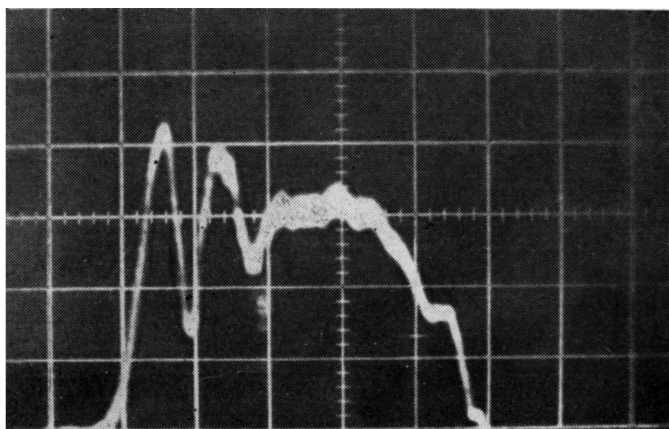


Рис. 4.

спектр в логарифмическом масштабе изображен на рис. 3, б, в для $f_0 = 2763$ и 2825 МГц соответственно, ц-на деления по горизонтали 10 МГц. Для сравнения на рис. 5 представлены огибающая и спектр сигнала для $\mu \approx 0.6$, когда автоколебания на огибающей практически отсутствуют. Изображенные спектры являются усредненными за время $\Delta t = 1$ с. Частота посылок высокочастотного сигнала 50 Гц, пучка — 6 Гц.

Прежде всего необходимо отметить, что независимо от наличия или отсутствия колебаний на огибающей в спектре имеются составляющие в области частот выше рабочей. Вблизи рабочей частоты эти составляющие расположены группами с характерным расстоянием по частоте порядка 10 МГц. Для более высоких частот такой порядок нарушается. Наличие колебаний в этой области частот объясняется тем, что инжектируемый пучок имеет скорость, меньшую, чем фазовая скорость ускоряющей волны $v_\phi = 0.97$ с, и на начальной стадии ускорения он возбуждает более высокочастотные составляющие с фазовыми скоростями меньше 0.97 с. Если рассматривать группирующие секции с обратной связью как кольцевой резонатор, то расстояние между его модами вблизи рабочей частоты составляет величину порядка 10 МГц, что и объясняет наличие характерных групп в спектре.

При возбуждении автомодуляции на данную картину накладываются дополнительные составляющие (рис. 3, б, в), амплитуда которых на несколько порядков больше, чем указанных выше. Расстояние между ними $\Delta f \sim 10$ МГц. Из анализа распределения спектральных составляющих следует, что сигнал на выходе секции является сложномодулированным колебанием либо с модуляцией амплитуды периодическим сигналом, либо с одновременным изменением амплитуды и фазы.

Возникновение автомодуляционного процесса определяется сложной внутренней динамической структурой. Детальное объяснение данного явления, а также результаты численного моделирования развивающихся процессов изложены в отдельной работе.

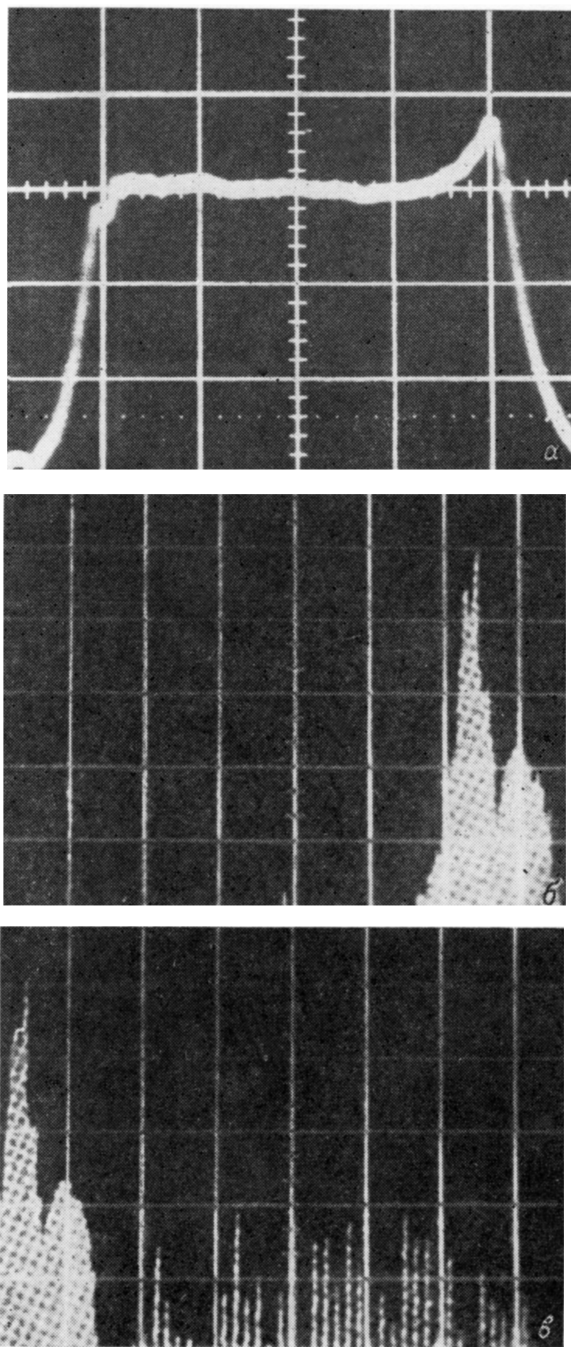


Рис. 5.

Таким образом, в данной работе экспериментально показана возможность возникновения автомодуляционного процесса в группирующей секции линейного ускорителя электронов с кольцом обратной связи. Данное явление явля-

ется пороговым по току пучка и может быть использовано для получения релятивистских пучков, промодулированных не только на рабочей частоте ускорителя, но и на более низкой частоте, определяемой электродинамическими характеристиками группирующей секции.

Литература

- [1] *Кислов В. Я., Дмитриев А. С.* В сб.: Проблемы современной радиотехники и электроники. М., 1983, с. 193—212.
- [2] *Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П.* В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1981, с. 101—144.
- [3] *Крамской Г. Д., Муфель В. Б.* ЖТФ, 1982, т. 52, № 3, с. 465—468.
- [4] *Крамской Г. Д., Махненко Л. А.* ЖТФ, 1982, т. 52, № 6, с. 1117—1121.
- [5] *Айзацкий Н. И., Дюков С. Н., Махненко Л. А.* В сб.: ВАНТ. Техника физического эксперимента. Харьков, 1983, № 3 (15), с. 45—47.

Поступило в Редакцию
16 мая 1986 г.
В окончательной редакции
4 декабря 1987 г.