

Разработка ВЧ-систем для электронных накопителей

В.П.Андросов, И.М.Карнаухов, Ю.П.Попков, С.Н.Рева, Ю.Н.Телегин

ИФВЭЯФ, ННЦ ХФТИ, г.Харьков

Разработка ВЧ-компонент на частоту 699,3 МГц началась в ХФТИ в 1986 году и была нацелена на создание ВЧ-системы накопителя-растяжителя НР-2000 [1]. Следует заметить, что все циклические электронные усилители в СССР работали в диапазоне частот 50 - 180 МГц, в то время как аналогичные машины за рубежом использовали более высокие частоты (350 - 700 МГц), что давало ряд технологических и экономических преимуществ. Такое положение было вызвано отсутствием ВЧ-компонент и, прежде

всего, мощных усилительных клистронов на эти частоты. Позже эта работа была поддержана в рамках программы линейных суперколлайдеров (ВЛЭПП).

Конечной целью этой деятельности явилась разработка 100 кВт ВЧ-станции на частоту 699,3 МГц, которая состоит из маломощной ВЧ-системы, клистронного усилителя, волноводного тракта передачи ВЧ-мощности и ускоряющей секции. Функциональная схема ВЧ-станции приведена на рисунке.

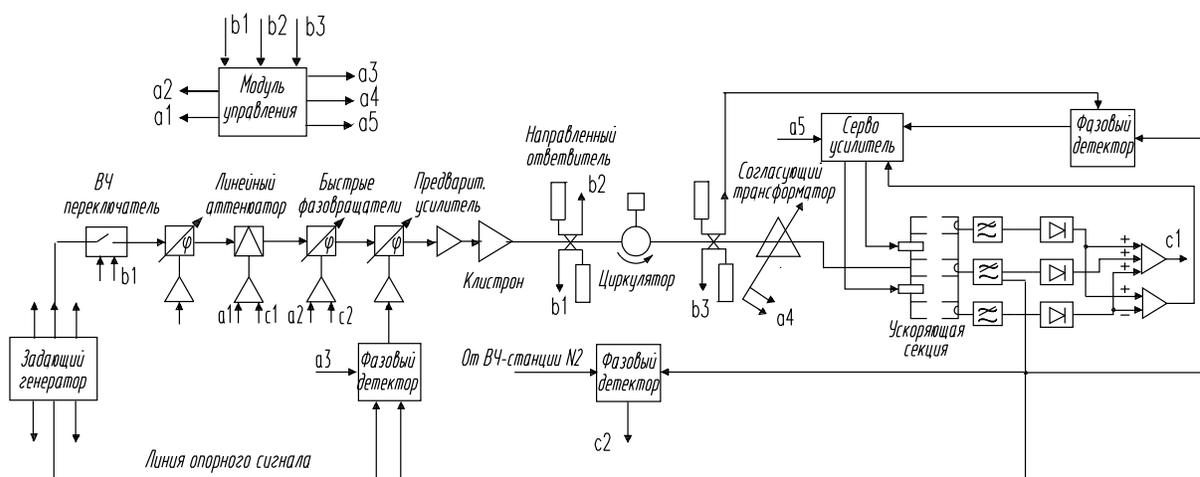


Рис. 1. Функциональная схема ВЧ-станции.

Маломощная ВЧ-система состоит из блока управления параметрами сигнала возбуждения, предварительного усилителя, а также цепей авто-матического регулирования АРФ, АРА и АПЧ.

Блок управления параметрами сигнала возбуждения включает в себя быстрый ВЧ-переключатель, фазовращатель для начальной установки фазы, два быстрых (~1мкс) электрически управляемых фазовращателя, быстрый (~1мкс) электрически управляемый линейный аттенуатор. Все элементы выполнены по полосковой технологии.

Система автоматического регулирования фазы (АРФ) при работе в режиме обратной связи поддерживает фазу ускоряющего напряжения с точностью $\pm 10^\circ$ в течение многих часов работы и в диапазоне уровней ВЧ-мощности ~40 дБ. Фаза сигнала с датчика в ускоряющей секции сравнивается в фазовом детекторе с опорной фазой и сигнал рассогласования управляет фазовращателем в блоке управления сигналом возбуждения. В режиме

программного изменения параметров система обеспечивает изменение фазы ускоряющего напряжения по определенному закону ("фазовый скачок" при инжекции интенсивного пучка, адиабатический подъем энергии в кольце и др.).

Система автоматического регулирования амплитуды (АРА) в режиме обратной связи поддерживает амплитуду ускоряющего напряжения с точностью $\pm 1\%$. Величина ВЧ-напряжения, равная сумме амплитуд протектированных сигналов со всех датчиков в секции, сравнивается в операционном усилителе с опорным напряжением, и сигнал ошибки управляет линейным аттенуатором в блоке управления сигналом возбуждения. Система предполагает также работу в режиме программного изменения амплитуды.

Система автоматической подстройки частоты (АПЧ) ускоряющей секции выполняет две задачи: 1) компенсация расстройки собственной частоты, вызванной температурными эффектами и нагрузкой пучком; 2) поддержание "плоского" поля, чтобы

избежать накопления запасенной мощности в одной из конечных ячеек секции. Обе задачи выполняются системой обратной связи, контролирующей движение поршней-тюнеров в ячейках 2 и 4. Подстройка частоты осуществляется параллельным движением тюнеров, баланс поля - движением в противоположных направлениях.

В случае использования нескольких ВЧ-станций используется также система относительной фазировки, которая поддерживает постоянным сдвиг фаз ускоряющих напряжений в различных секциях, обеспечивая постоянный синхронизм между ВЧ-полем и частицей в каждой секции.

Требуемая ВЧ-мощность обеспечивается усиленным клистроном "Вий", основные параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочая частота, МГц	699.3
Выходная мощность, кВт	100
Высокое напряжение, кВ	28
Ток пучка, А	6.2
Электронный к.п.д., %	55
Полоса 1 дБ, МГц	±3.5
Усиление, дБ	45

ВЧ-мощность с выхода клистрона через коаксиально-волноводный переход подается в волновод прямоугольного сечения (292x146мм²). У - циркулятор, расположенный в волноводной линии, защищает клистрон от мощности, отраженной на входе в секцию. Направленный ответвитель, расположенный на выходе клистроны, контролирует уровни падающей и отраженной мощности и подает сигнал блокировки на ВЧ-переключатель в случае превышения уровня последней. Второй направленный ответвитель контролирует уровни падающей и отраженной мощности на входе в секцию и обеспечивает опорный сигнал для системы АПЧ. Для согласования волноводной линии с ускоряющей секцией при различных токах пучка на входе в секцию установлен согласующий трансформатор.

Пятирезонаторная ускоряющая секция на стоячей волне обеспечивает ВЧ-напряжение 0.75 МВ. Секция запитывается через окно в центральном резонаторе и отделяется от волноводной линии керамическим гермоокном баночного типа. Каждая ячейка снабжена поршнем-тюнером для подстройки собственной частоты и датчиком поля. Во время работы тюнеры в ячейках 2 и 4 включены в систему АПЧ, обеспечивающую перестройку собственной частоты секции в пределах ± 200 кГц.

Важной характеристикой ускоряющего резонатора является спектр собственных колебаний, которые могут возбуждаться при взаимодействии пучка с резонатором. Эти высшие (по отношению к основной моде E₀₁₀) моды колебаний являются причиной возникновения когерентных многосгустковых неустойчивостей, которые, как правило, и ограничивают предельные токи в современных

накопителях - источниках СИ. Наши расчеты показали [2], что резонатор, форма ячейки которого оптимизирована по величине шунтового импеданса на основном (рабочем) типе колебаний E₀₁₀, обладает также, в среднем, и наименьшими импедансами связи на высших модах.

В табл. 2 приведены собственные частоты и факторы R_{i||}/Q_i (R_{i⊥}/Q_i) для монополярных (дипольных) видов колебаний в резонаторе. Идентификация типов колебаний проводилась на основе мод цилиндрического резонатора. Для дипольных мод использованы двойные обозначения, указывающие на наличие одновременно компонент электрического и магнитного поля на оси в отличие от мод цилиндрического резонатора. Тип дипольной моды-ЕН или НЕ-определялся по преобладанию Е- или Н- поля на оси структуры.

Таблица 2

Тип колебаний	Q _i	f _i , МГц	R _{i ,⊥} /Q _i Ом/м
E ₀₁₀	33600	699,3	864
HE ₁₁₁	19900	1001,4	3
E ₀₁₁	28800	1050,3	234
EH ₁₁₀	39600	1122,2	141
EH ₁₁₁	37800	1387,1	170
HE ₁₁₂	40000	1657,0	3
E ₀₂₀	66000	1736,5	38
E ₀₁₂	36200	1741,1	5
HE ₁₁₁	88100	1796,8	0,4
EH ₁₁₂	23800	1803,2	9
E ₀₂₁	43500	1986,1	74

Проведенные расчеты показывают, что наиболее опасными, с точки зрения возбуждения неустойчивости связанных колебаний сгустков, являются монополярная мода E₀₁₁ и дипольные моды EH₁₁₀ и EH₁₁₁, имеющие наибольшую величину сопротивлений связи. Для подавления этих неустойчивостей используется метод отстройки резонансных частот паразитных колебаний с помощью изменения температуры резонаторов. Разработанная нами система автоматического регулирования температуры ускоряющих секций обладает широким динамическим диапазоном и точностью поддержания температуры 0,1°С, необходимыми для успешной реализации этого метода.

Литература

1. P.I.Gladkikh et al. Preprint KFTI 90-22, Kharkov, 1990, 34p.
2. I.M.Karnaukhov et al. Proc. of the EPAC-90 (June, 1990, Nice), pp.1034-1036.

Статья поступила: в редакцию 25 мая 1998 г.,
в издательство 1 июня 1998 г.