

НОВАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ ВЭШ-3

В.С.Арбузов, А.Н.Балов, С.А.Беломестных, С.И.Бибко,
 А.А.Бушуев, В.Г.Вещеревич, В.Н.Волков, Э.И.Горникер,
 С.А.Крутихин, И.В.Кушцов, Г.Я.Куркин, Н.Н.Лебедев,
 В.М.Меджидзаде, В.М.Петров, А.М.Пилан, И.К.Седяров

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Для обеспечения работы накопительного кольца ВЭШ-3 в двухступковом режиме создана новая ВЧ-система, состоящая из двух ускоряющих резонаторов, трех усилителей мощности и аппаратуры управления и контроля.

В старой ВЧ-системе /1/ для быстрого накопления использовалась первая гармоника частоты обращения. Второй резонатор работал на 19 гармонике и обеспечивал работу на высокой энергии. Чтобы получить один ступок во время накопления, резонатор высокой гармоники необходимо было очень сильно расстраивать. Его расстройка должна удовлетворять условию

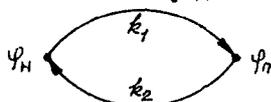
$$\Delta f > \frac{2 \varphi_2 f_0 I_0 \rho_2}{3 \beta \varphi_1 \omega_1 \cos \varphi_3}$$

где f_0 - частота обращения; I_0 - накопленный ток; ρ_2 - характеристическое сопротивление резонатора высокой гармоники; ω_1 - амплитуда напряжения низкой гармоники; φ_3 - равновесная фаза. При включении напряжения 19 гармоники резонатор приходилось настраивать. Процесс перестройки резонатора и подъема напряжения требовал тонкой настройки, так как мог сопровождаться синхротронными колебаниями и потерей частиц.

Поскольку два одинаковых и симметрично расположенных ступка не наводят напряжение на резонаторе нечетной гармоники, то в двухступковом режиме было заманчиво применить вторую и девятнадцатую гармоники, не очень сильно расстраивая резонатор последней, работающий в пассивном режиме. Это, казалось, давало возможность накопить два ступка, сохранить быстрое накопление, использовать два сильных резонанса на нечетной и четной гармониках для подавления синфазной и противофазной моды фазовых колебаний ступков. Однако, оказалось, что если в ускорителе есть n симметричных ступков и есть пассивный резонатор, настроенный на гармонику, не кратную n , то при достаточно большом сопротивлении этого резонатора фазовое движение ступков статически неустойчиво. При малейшем толчке, приводящем к несимметрии ступков, на пассивном резонаторе наводится напряжение, которое способствует развитию несимметрии ступков. Чтобы в двухступковом режиме движение ступков было статически устойчивым, расстройка пассивного резонатора должна удовлетворять условию

$$\Delta f > \frac{\varphi_2 f_0 I_0 \rho_2}{\varphi_1 \omega_1 \cos \varphi_3}$$

При перехвате в 19 гармонику ступки располагаются в накопителе несимметрично. Условие отсутствия когерентных синхротронных колебаний для этого случая оказалось существенно отличным от условия при симметрично расположенных ступках. Фазовому движению симметричной системы из n макрочастиц соответствует направленный граф, показанный на рис. I



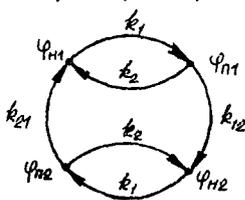
1/2/, 1/3/, где φ_n - фаза пучка частиц; φ_n - фаза напряжения на резонаторе;

Рис. I. Направленный граф для симметричной системы из n макрочастиц.

$$k_1 = \frac{-j \frac{\omega_0}{\omega} Q}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

$$k_2 = \frac{\sum q A_q I_0 [-(X_{q+} + X_{q-}) + j(Z_{q+} + Z_{q-})]}{2 \sum q U_q \cos \varphi_q};$$

Q, ω_0 - добротность и частота синхротронных колебаний; Ω - частота возмущающего воздействия; q - номер гармоники; A_q - коэффициент гармоники; $X_{q+}, X_{q-}, Z_{q+}, Z_{q-}$ - реактивные и активные сопротивления резонатора на



верхней и нижней боковой частотах q -й гармоники; U_q - напряжение q -й гармоники; φ_q - равновесная фаза q -й гармоники.

Движению несимметричной системы из двух одинаковых ступков будет соответствовать направленный граф, показанный на рис.2, где φ_{n1} и φ_{n2} - фазы первого и второго пучков; φ_{n1} и φ_{n2} - фазы напряжения на резонаторах для первого и второго пучков;

Рис.2. Направленный граф для несимметричной системы из двух одинаковых ступков.

$$k_{21} = \frac{\sum A_q I_0 [-(X_{q+} + X_{q-}) \cos \theta + j(Z_{q+} + Z_{q-}) \sin \theta + j(X_{q+} - X_{q-}) \sin \theta]}{\sum q U_q \sin \varphi_q};$$

$\theta = q\omega_0 \Delta t$; Δt - отрезок времени между моментами пролета ступков через резонатор. Исследование этой системы показало, что даже при двух резонаторах, второй и девятнадцатой гармоники, при некоторых расстройках возможно возбуждение синхротронных колебаний (оба резонатора при этом расстроены вниз). Поэтому было решено выбрать для быстрого накопления частиц в два ступка вторую гармонику, для работы на высоких энергиях - восемнадцатую гармонику и пятую гармонику для разведения частот синхротронных колебаний ступков. При этом один резонатор возбуждается на второй гармонике частоты обращения, а другой - в двухмодовом режиме на восемнадцатой и пятой гармониках.

Схематический чертеж резонатора второй гармоники представлен на рис.3. Резонатор представляет собой короткозамкнутый отрезок коаксиальной линии, нагруженный на емкость величиной 1300 пФ (6) из 20 вакуумных конденсаторов К61-4 (50 и 100 пФ, 45 кВ) и 2 вакуумных конденсаторов переменной емкости КП1-3 (5-100 пФ, 25 кВ). Резонатор состоит из двух частей, которые охватывают керамический изолятор (7), впаянный в вакуумную камеру накопителя (3). Настройка резонатора осуществляется вращающейся рамкой (2). Охлаждается резонатор дистиллированной водой, протекающей по трубкам, припаянным к корпусу резонатора (1), стенкам внутреннего проводника коаксиальной линии (8) и петле ввода мощности (5). Корпуса вакуумных конденсаторов имеют принудительное воздушное охлаждение. Резонатор имеет следующие электрические параметры: добротность - 4000, характеристическое сопротивление - 12 Ом, шунтовое сопротивление - 48 кОм, максимальная амплитуда напряжения на зазоре - 20 кВ.

Второй ускоряющий резонатор вакуумный и работает в двухмодовом режиме на частотах 72,54 МГц и 20,15 МГц. По конструкции (рис.4) нижней полости, резонирующей на частоте 72,54 МГц, он аналогичен старому резонатору накопителя ВЭП-3 /1/, работавшему на частоте 76,57 МГц. Внутри корпуса нижней полости (8) на штанге (10) подвешена медная труба с дисками ("катушка"). По штанге на катушку подается постоянное напряжение до 20 кВ для подавления вторичного электронного разряда. Четвертьволновый отрезок коаксиальной линии (3) служит для замыкания катушки напряжения 18 гармоники, которое появляется на штанге вследствие асимметрии катушки относительно корпуса. Настройка резонатора осуществляется упругой деформацией торцевых стенок резонатора. Подстройка резонатора 5-й

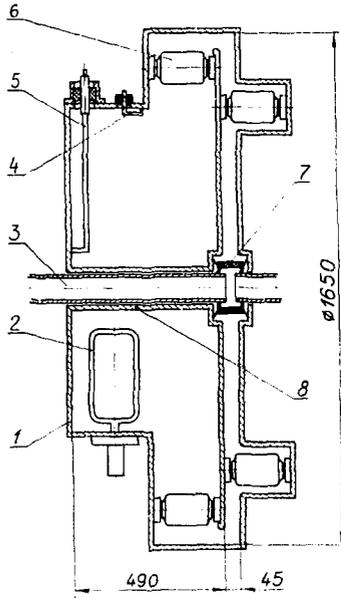
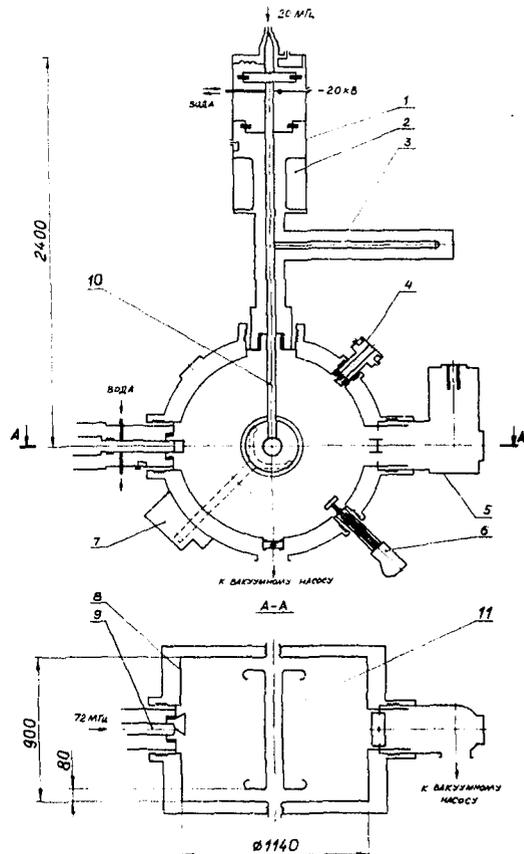


Рис. 3. Ускоряющий резонатор
8,06 МГц:

1 - корпус; 2 - петля подстройки; 3 - вакуумная камера; 4 - датчик напряжения; 5 - петля ввода мощности; 6 - вакуумные конденсаторы; 7 - керамический изолятор; 8 - внутренний проводник коаксиальной линии.

Рис. 4. Ускоряющий резонатор
72,54 МГц и 20,15 МГц:
I - резонансная полость частоты 20,15 МГц; 2 - пластины перестройки частоты 20,15 МГц; 3 - четвертьволновый короткозамыкатель 72,54 МГц; 4 - датчик напряжения; 5 - сорбционный насос; 6 - механизм подстройки высших мод; 7 - механизм подстройки 72,54 МГц; 8 - корпус; 9 - ввод мощности 72,54 МГц; 10 - штанга; 11 - труба с дисками ("катушка").



гармоники осуществляется шестью вращающимися пластинами (2). Охлаждается резонатор дистиллированной водой. Резонатор имеет следующие электрические параметры на 18 гармонике: добротность - 23000; характеристическое сопротивление - 150 Ом; шунтовое сопротивление - 3,45 МОм; максимальное ускоряющее напряжение - 800 кВ; коэффициент пролетного времени - 0,8. Электрические параметры резонатора на 5 гармонике: добротность - 2100; характеристическое сопротивление - 75 Ом; шунтовое сопротивление - 157 кОм; максимальное ускоряющее напряжение - 12 кВ; коэффициент пролетного времени - 0,34.

ВЧ-питание резонаторов осуществляется от трех усилителей мощности. Один из них (на частоту 8,06 МГц) имеет выходной каскад на двух лампах ГУ-36Б и развивает мощность до 20 кВт. Усилитель мощности на частоту 72,54 МГц имеет выходную мощность до 120 кВт. Его выходной каскад двухтактный, на тетрадах ГУ-53А. В качестве усилителя мощности 5 гармонике 20,15 МГц использован передатчик с максимальной выходной мощностью 5 кВт.

Аппаратура управления ВЧ-системой обеспечивает включение и выключение ВЧ-мощности, авторегулирование усиления для стабилизации напряжения на резонаторах или тока фидеров, а также выключение ВЧ-мощности в аварийных режимах. Резонаторы снабжены устройствами для автоматической подстройки собственных частот с помощью сервоприводов. Управление сервоприводом для малых расстройек резонатора осуществляется от фазометра, измеряющего разность фаз между напряжением на ускоряющем зазоре и током фидера резонатора. При больших расстройках сервопривод управляется от потенциометрического датчика, установленного на резонаторе. Система синхронизации обеспечивает фазировку ускоряющих ВЧ-напряжений между собой. Для синхронизации перепуска в ВЭПП-3 из синхротрона Б-4, являющегося его инжектором, частота обращения Б-4 жестко привязана к частоте обращения ВЭПП-3 с помощью петли ФАПЧ, так что

$$f_{Б-4} = \frac{N_1}{N_2} f_{ВЭПП-3},$$

где N_1 и N_2 - целые числа. Частоту Б-4 можно менять, изменяя коэффициент N_1 с дискретностью 10 кГц в пределах $\pm 3\%$ от средней частоты (37,4 МГц).

Литература

1. В.Г.Вещеревич и др. Высокочастотная система электрон-позитронного накопительного кольца ВЭПП-3. Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1972, т.2, с.164.
2. М.М.Карлинер. Устойчивость фазового движения многих ступков в накопителях заряженных частиц.-ЖТФ, т.41, в.9, с.1806.
3. С.Мэзон, Г.Циммерман. Электронные цепи, сигналы и системы. М.: ИЛ, 1963.