

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРАКТ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ОТ УСИЛИТЕЛЯ ДО УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА СИНХРОТРОНА

Г. Н. ОСТРЕЙКО, В. С. ПАНАСЮК, А. Д. ПАНФИЛОВ,
И. К. СЕДЛЯРОВ

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

(Получено 9 февраля 1966 г.)

Описан широкополосный тракт передачи в. ч. мощности от усилителя до симметричного ускоряющего резонатора синхротрона. Приведены частотная характеристика тракта и ее трансформация при изменении некоторых параметров. Рассмотрено влияние дополнительного резонанса в системе симметричного питания резонатора от коаксиального фидера.

В ряде случаев в синхротрон инжектируются неполностью релятивистские электроны. При этом во избежание потерь частиц при ускорении желательно (а иногда и необходимо) иметь модуляцию частоты ускоряющего напряжения.

Тракт передачи мощности от выходного каскада усилителя к ускоряющему резонатору представляет собой сложную колебательную систему, состоящую из усилительной лампы, резонансного контура усилителя, фидера и ускоряющего резонатора, которая в рабочем диапазоне частот может создавать ту или иную неравномерность напряжения на ускоряющем промежутке. Для облегчения эксплуатации и профилактики в. ч. усилитель выгодно располагать вне ускорительного зала с радиационной защитой. Тогда фидер от в. ч. усилителя до ускоряющего резонатора может иметь геометрическую длину, равную многим электрическим длинам волны рабочей частоты. В зависимости от требований, предъявляемых собственно к резонатору и особенностей конструкции ускорителя, резонатор может быть выполнен асимметричной или симметричной конструкции. Симметричная схема, рассматриваемая ниже, была применена при конструировании ускоряющего резонатора синхротрона Б-3М [1], инжектора позитрон-электронного накопителя.

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА В. Ч. ТРАКТА

На рис. 1 дана принципиальная схема широкополосного в. ч. тракта. Резонатор пред-

ставляет собой две коаксиальные линии, укороченные большой емкостью. Поскольку резонатор шунтируется настолько сильно, что токи через активные шунтирующие сопротивления составляют заметную долю реактивных контурных токов, целесообразно иметь симметричную схему шунтирования резонатора и подвода к нему мощности. В противном случае неизбежны вредные перекосы в резонансной кривой резонатора. Заметим, что симметричное питание и шунтирование резонатора при прочих равных условиях позволяет увеличить запас электрической прочности (в. ч. мощность разделяется на два канала) как в изоляторах вводов, так и в подводящих в. ч. коммуникациях.

В рассматриваемом тракте в. ч. мощность от усилителя к ускоряющему резонатору канализируется сначала коаксиальным фидером с воздушной изоляцией $W_{\phi} = 50 \text{ ом}$ и длиной $\sim 15\lambda_0$ (λ_0 — длина волны ускоряющего напряжения) и далее небольшими отрезками гибкого в. ч. кабеля. Необходимость кабельного перехода от фидера к ус-

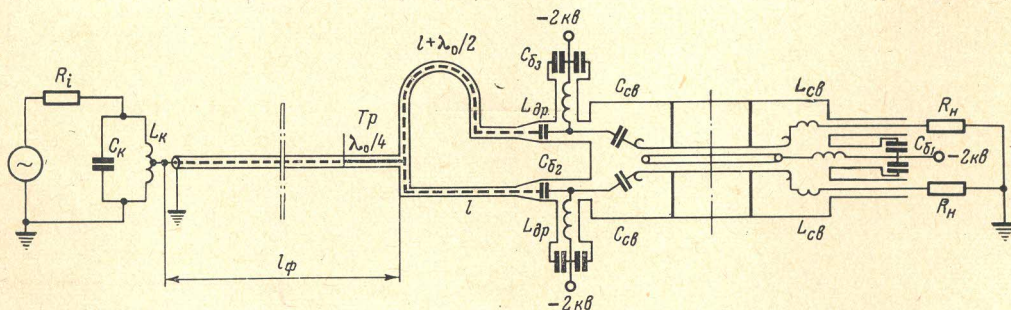


Рис. 1. Принципиальная схема широкополосного в. ч. тракта с симметричной конструкцией резонатора

корящему резонатору объясняется присутствием специального переходного устройства, которое дает возможность оперативно изменять длину питающего фидера в пределах четверти длины волны. Оно одновременно согласует волновое сопротивление фидера с волновым сопротивлением кабелей. Помимо этого, путем оперативного изменения длины одного из каналов кабельного разветвления можно точно подстроить противофазность питания резонатора, осуществляющуюся за счет разности электрических длин кабелей на половину волны. Связь с резонатором со стороны питающего фидера производится емкостными элементами. Шунтирующие сопротивления подключены через индуктивные элементы связи при помощи в. ч. кабелей, позволяющих отвести сопротивления и блок их масляного охлаждения в сторону от резонатора. Разные знаки связей облегчают настройку тракта. Действительно, на резонансной частоте ускоряющего резонатора при равенстве модулей сопротивлений связи к. б. в. в фидере зависит только от величины шунтирующего сопротивления, которое, в свою очередь, подбирается равным волновому сопротивлению кабеля. Емкостные вводы резонатора по постоянному току отделены от других токоведущих цепей блокировочными конденсаторами (C_6) для подачи постоянного смещения, подавляющего резонансный высокочастотный разряд (мультипактор). В ускоряющем промежутке мультипактор подавляется специальным «очищающим» кольцом, на которое подается постоянное напряжение ($-2 кВ$) [2].

Очевидно, внутреннее сопротивление лампы выходного каскада генератора, трансформируемое анодным контуром, через фидер подключается к резонатору, дополнительно расширяя его полосу пропускания. Все параметры в. ч. тракта не зависят от амплитуды напряжения и, следовательно, потока мощности в резонатор. Исключение составляет внутреннее сопротивление лампы [3], которое может меняться в цикле ускорения, если применяется амплитудная модуляция для снижения ускоряющего напряжения при захвате пучка¹ [4]. Таким образом,

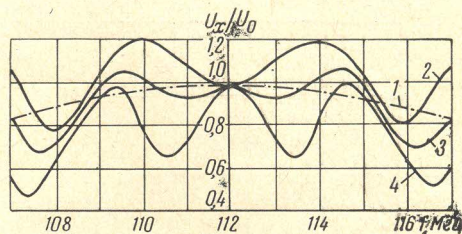


Рис. 2. Частотные характеристики системы резонатор — фидер — выходной каскад генератора при различных значениях внутреннего сопротивления генератора: $R_i = 160 \text{ ом}$ (2); $R_i = 200 \text{ ом}$ (3); $R_i = 300 \text{ ом}$ (4)

представляет интерес оценить частотную характеристику тракта в зависимости от величины внутреннего сопротивления лампы выходного каскада усилителя. На рис. 2 приведена расчетная частотная характеристика системы резонатор — фидер — выходной каскад генератора с добротностью резонатора $Q = 15$, длиной фидера $15\lambda_0$, его волновым сопротивлением $W_\phi = 50 \text{ ом}$ и характеристическим сопротивлением промежуточного контура $\rho = 28 \text{ ом}$ при различных значениях внутреннего сопротивления лампы. На том же рисунке для сравнения приведена частотная характеристика системы для случая, когда фидер со стороны генератора нагружен на активное сопротивление, равное волновому (кривая 1). Зависимость амплитуды напряжения на резонаторе от резонансных свойств системы проявляется в виде «выбросов» и «провалов» на огибающей в. ч. напряжения при модуляции и демодуляции частоты в конце цикла ускорения [1]. При изменении длины фидера, очевидно, происходит смещение максимумов и минимумов частотной характеристики. На рис. 3 показаны расчетные кривые при трех длинах фидера. Регулируя длину фидера, можно получить максимум напряжения, например, на конечной частоте диапазона, где происходит ускорение релятивистских частиц.

На осциллограмме рис. 4 приведена форма огибающей в. ч. импульса напряжения в цикле ускорения на синхротроне Б-ЗМ. Модуляция фронта импульса выполняется искусственно [4]. Разумеется, для каждого конкретного в. ч. тракта эти кривые будут разными и форма их должна быть такой,

¹ Влиянием пучка на параметры тракта можно пренебречь, поскольку мощность, идущая на ускорение, мала по сравнению с теряемой в шунтирующих сопротивлениях.

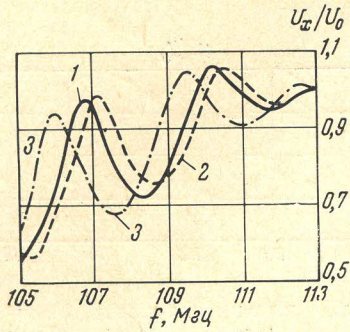


Рис. 3. Частотные характеристики системы при $R_i = 200 \text{ ом}$ и трех длинах фидера: 1 — $l = 15 \lambda_0$; 2 — $l = 15 \lambda_0 - 0,052 \lambda_0$; 3 — $l = 15 \lambda_0 + 0,107 \lambda_0$

чтобы удовлетворить необходимому закону изменения в. ч. напряжения на ускоряющем промежутке.

Особенностью симметричного в. ч. тракта является присутствие еще одного резонансного контура, образованного элементами связи резонатора с фидером и двумя разветвлениями кабелей. При случайных пробоях в ускоряющем промежутке, когда к. б. в. во всем тракте резко нарушается, в этом контуре могут возникнуть перенапряжения. Величина перенапряжений зависит от добротности рассматриваемого контура, а также от разности между собственной резонансной частотой его и рабочей частотой всей системы. На рис. 5 показана частотная зависимость входной активной и реактивной проводимости разветвленной части в. ч. тракта в точке подключения общего фидера при длине кабелей противофазного питания $l_{\Sigma} = 10,78 \text{ м}$ и добротности резонатора $Q = 15$. Как видно из графика, кроме резонанса на основной частоте f_0 наблюдаются

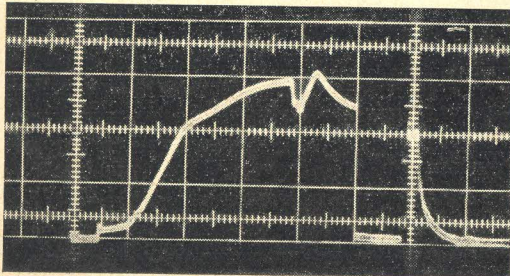


Рис. 4. Осциллограмма огибающей в. ч. напряжения на резонаторе

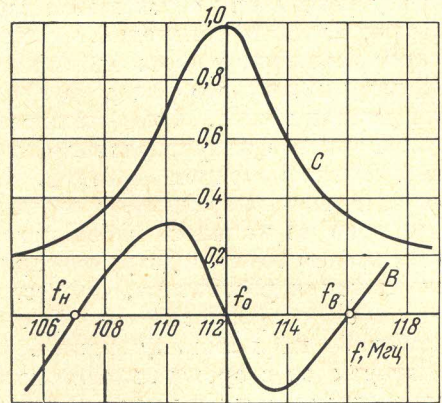


Рис. 5. Входная проводимость петли противофазного питания резонатора в точке подключения фидера. G — активная проводимость, B — реактивная проводимость

еще два дополнительных резонанса на частотах выше и ниже основной частоты ($f_в$, $f_н$).

При относительно высокой добротности дополнительных резонансов на их частоте могут наступить недопустимые перенапряжения в петле противофазного питания, приводящие к пробоям кабелей. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы значения частот дополнительных резонансов лежали бы вне рабочего диапазона частот всего тракта. Этого можно добиться соответствующим выбором общей длины кабелей петли противофазного питания. На рис. 6 показана экспериментальная зависимость значений нижней частоты дополнительного резонанса от длины кабелей и указана выбранная рабочая длина кабелей $l_{\Sigma} = 4,03 \lambda_0$.

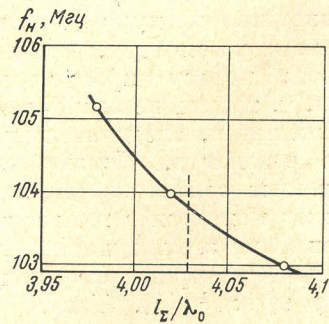


Рис. 6. Экспериментальная кривая зависимости частоты дополнительного резонанса от суммарной длины кабелей противофазной запитки

В заключение приведем параметры широкополосного тракта синхротрона Б-3М при ускорении электронов до энергии 250 Мэв. Напряжение на ускоряющем промежутке 35 кв. Несущая частота 112 Мгц. Ширина полосы от несущей с неравномерностью амплитудной характеристики 30% — 7%. Добротность шунтированного ускоряющего резонатора 15. Характеристическое сопротивление резонатора 40 ом. Длина фидера от в. ч. усилителя к резонатору 15 электрических длин волн. Полезная мощность выходного каскада в. ч. усилителя в импульсе 1,1 Мвт.

Авторы выражают благодарность И. А. Шехтману, О. А. Нежевенко и А. Ф. Серову за помощь в работе и постоянный интерес, проявляемый к ней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Будкер и др. Доклад на Международной конференции по ускорителям, Фраскати, 1965.
2. Б. А. Загер, В. Г. Тишин, Препринт ОИЯИ, № 1058, 1962, Дубна.
3. З. И. Модель, Н. С. Фузик, Радиотехника, 1959, 14, № 5, 49.
4. М. Ю. Гельцель, Г. Н. Острейко, В. С. Панасюк, А. И. Юдин, ПТЭ, 1966, № 3, 23.

УДК 621.384.66

К РАСЧЕТУ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЧАСТИЦ

Б. И. БОНДАРЕВ

Радиотехнический институт АН СССР, Москва

(Получено 7 февраля 1966 г.)

Приведены диаграммы устойчивости, позволяющие практически рассчитывать каналы транспортировки с периодически расположенными линзами — квадрупольными дублетами, а также линзами с продольным магнитным полем.

В ускорительной технике для транспортировки пучков заряженных частиц широко применяются каналы с магнитными фокусирующими линзами. Методам расчета фокусирующих каналов посвящено большое количество работ (например обзор [1]). Однако в них обычно излагается общая методика, а кулоновское расталкивание часто не учитывается. Цель данной заметки — привести соотношения и диаграммы, позволяющие практически рассчитывать каналы транспортировки, учитывая кулоновское расталкивание аппроксимацией сгустков равномерно заряженными эллипсоидами. Ниже рассмотрены каналы с редко расположенными квадрупольными дублетами, а также линзами с продольным магнитным полем.

Рассмотрим жесткофокусирующий канал, состоящий из периодически расставленных дублетов квадрупольных линз. Пользуясь

методикой [2] гл. 4, определим параметры μ , ν , γ -угловую частоту, амплитудный коэффициент и коэффициент модуляции радиальных колебаний. На рис. 1 приведена диаграмма устойчивости с линиями постоянного значения μ , ν , γ , рассчитанная для случая, когда длины фокусирующей и дефокусирующей линз равны и в сумме составляют 0,2 от длины периода. По оси абсцисс на диаграмме отложен параметр кулоновской дефокусировки

$$A = 2870 \frac{I}{f} L^2 \frac{(1 - \beta^2)^{3/2}}{\beta^2} \frac{\gamma \langle M_x \rangle}{R^2 b}, \quad (1)$$

по оси ординат — параметр Λ^2 , которому пропорционален градиент магнитного поля в линзе

$$H' = \Pi \cdot 10^6 \frac{\beta}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \frac{\Lambda^2}{L^2}, \quad (2)$$