

# Радиочастотная обратная связь в ускоряющей станции У-70

П.В. Белов, О.П. Лебедев, В.А. Чубрик

*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

## Введение

С увеличением интенсивности пучка в ускорителе вопрос уменьшения шунтового сопротивления ускоряющей системы становится актуальным [1]. К этому можно добавить эффекты, связанные с разгруппировкой пучка на основном плато магнитного поля У-70, когда пучок взаимодействует с выключенными, но не зашунтированными резонаторами.

Решить поставленную задачу можно несколькими путями [2]. Для ускоряющей станции У-70 оптимальный путь тот, что был реализован в PS CERN [3]. Под оптимальностью здесь подразумеваются минимальные технические переделки в станции и, следовательно, минимальные экономические затраты.

При создании ускоряющей системы У-70 "Графит" закладывалась возможность реализации высокочастотной отрицательной обратной связи (ВЧ ООС), когда часть сигнала с резонатора подавалась на вход усилительного ВЧ-тракта станции [4]. Однако из-за большой крутизны фазочастотной характеристики (ФЧХ) тракта ( $5 \cdot 10^{-2}$  град/кГц) не удалось получить устойчивую работу цепи ООС при перестройке частоты резонатора от 2,6 до 6,1 МГц. Ситуация изменилась в лучшую сторону после проведения модернизации ускоряющей системы "Графит" с целью увеличения емкости ускоряющих зазоров [5]. В ходе модернизации был уменьшен диапазон перестройки, и сегодня он составляет 5,35–6,1 МГц.

## Техническая реализация и экспериментальные исследования

На рис.1 показана эквивалентная схема цепи радиочастотной обратной связи в ускоряющей станции У-70. Усилительный тракт состоит из трех каскадов: дифференциального, предварительного и оконечного, работающего на резонатор. Предварительный и оконечный выполнены на лампах ГУ-73Б и ГУ36Б соответственно, причем в оконечном каскаде работают две лампы, включенные в параллель. Общая входная емкость оконечного каскада составляет величину  $C_g = 490$  пФ и вместе с индуктивностью  $L_g$  образует резонансный контур, который настроен на частоту, большую по величине, чем рабочая. Индуктивность  $L_g$  выполнена в виде дросселя, обеспечивающего подачу сеточного напряжения для установки рабочей точки оконечных ламп. Общий коэффициент усиления тракта по напряжению составляет  $\cdot 10^4$ . Резонатор на схеме представлен в виде резонансного контура  $L, C, R$ , настроенного на рабочую частоту,

где  $L$  – перестраиваемая индуктивность, а  $R$  – шунтовое сопротивление резонатора. Напряжение  $V$  с резонатора через аттенюатор подается на вход дифференциального усилителя, а на другой вход поступает ВЧ-сигнал возбуждения станции  $V_{in}$ .

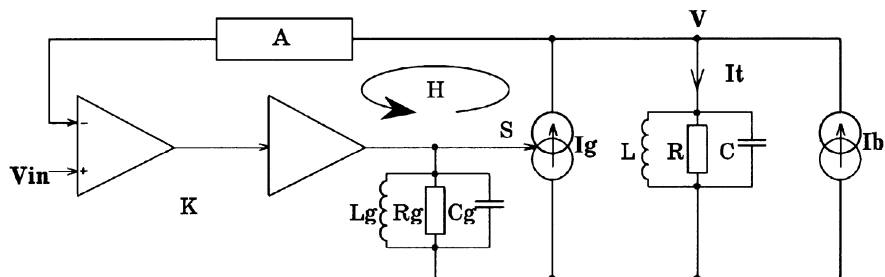


Рис. 1: Эквивалентная схема ВЧ ООС в ускоряющей станции У-70.

Для обеспечения устойчивости ВЧ ООС в станции в качестве первого шага необходимо выполнить требование нулевого фазового сдвига между сигналами, приходящими на входы дифференциального усилителя. Однако из-за большой крутизны ФЧХ тракта это требование реализуется только для одной частоты. Была взята частота 5,8 МГц, являющаяся центральной для рабочего диапазона частот резонатора. Изменением величин индуктивности дросселя  $L_g$  и добротности  $Q_g$  сеточного контура  $L_g, C_g, R_g$  при известной задержке сигнала возбуждения в предварительных каскадах усиления фазовый сдвиг между напряжением настроенного резонатора  $V$  и входом возбуждения станции  $V_{in}$  устанавливался порядка  $-80^\circ$ . Этот фазовый сдвиг был впоследствии скомпенсирован цепью аттенюатора, состоящего из отрезка кабеля, соединяющего резонатор с входом дифференциального усилителя, и дифференцирующего звена с высокой частотой среза ( $\sim 700$  МГц). Звено уменьшает амплитуду сигнала на рабочей частоте на  $\sim 40$  Дб. Дальнейшее подавление амплитуды сигнала осуществляется емкостным и резистивным делителями, причем последний сделан регулируемым для установки петлевого коэффициента  $H$ .

В ходе формирования АЧХ и ФЧХ цепи обратной связи также учитывались требования устойчивости для синфазного резонанса. Резонанс наблюдался на частоте порядка 14 МГц и при этом петлевой коэффициент усиления  $H$  был выше единицы.

Еще одно требование, которое необходимо выполнить, – симметричная резонансная характеристика импеданса станции с ВЧ ООС. Наличие дополнительного резонансного контура  $L_g, C_g, R_g$  в цепи вносит асимметрию в резонансную характеристику импеданса резонатора. В свою очередь, это оказывает влияние на устойчивость гармоник частоты обращения, присутствующих в спектре тока пучка. Чтобы получить резонансную характеристику с асимметрией, меньшей 10% на уровне 0,5 при петлевом коэффициенте больше 5, следует поддерживать петлевой сдвиг фаз при перестройке рабочей частоты меньше  $6^\circ$ . Таким образом, необходимо переделать усилительный тракт, в котором групповое время задержки не должно превышать 30 нс, или в существующем тракте при изменении частоты сигнала возбуждения и тока пучка следует в динамике управлять АЧХ и ФЧХ цепи ВЧ ООС.

Если не изменять параметры цепи, то требование к симметрии резонансной характеристики удовлетворяются при петлевом коэффициенте  $H \leq 3$ .  $H = AKSR$ , где  $A$  –

коэффициент передачи аттенюатора,  $K$  – суммарный коэффициент усиления предварительных усилителей,  $S$  – крутизна характеристики оконечного каскада. Нетрудно показать, что в цепи, приведенной на рис.1, шунтовое сопротивление, которое “видит” пучок, будет  $R^* = R/(1 + H)$ , а относительный коэффициент подгрузки резонатора пучком  $Y^* = Y/(1 + H)$ , где  $Y = I_b/I_0$ ;  $I_b$  – ток пучка,  $I_0$  – ток ненагруженного резонатора при резонансе [2]. Следовательно, шунтовое сопротивление может быть уменьшено в 4 раза.

На стендовой станции был опробован способ, при котором варьировалась величина индуктивности  $L_g$ . Для этого воздушный дроссель был заменен на дроссель с ферритом. Магнитная проницаемость феррита изменялась постоянным подмагничиванием. Для выбранных значений частот в диапазоне 5,5–6,1 МГц потребовалось изменить резонансную частоту  $L_g, C_g, R_g$  контура в пределах 5,82–6,7 МГц, чтобы выполнить выше указанные требования. В качестве альтернативного варианта может быть предложено управление АЧХ и ФЧХ цепи ВЧ ООС аттенюатором, в котором регулируемые элементы являются резисторы и конденсаторы.

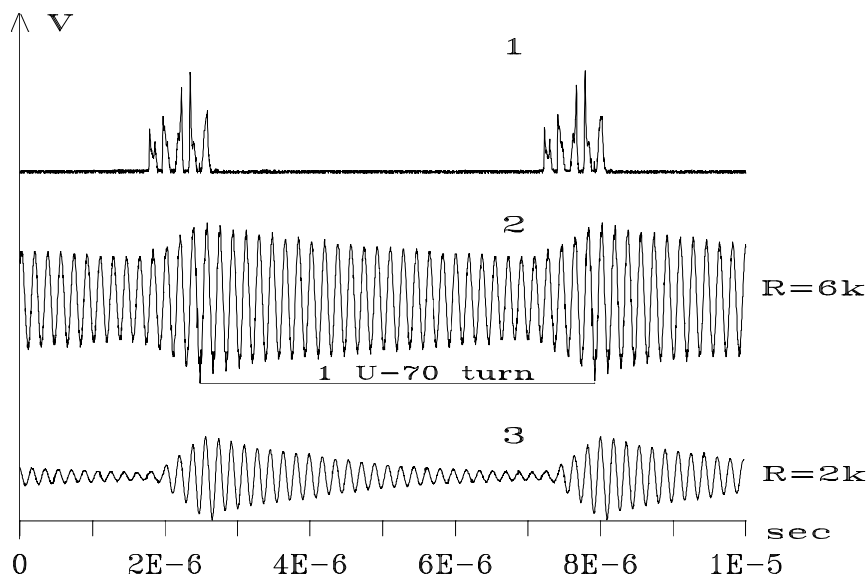


Рис. 2: Сигналы на резонаторах станций. 1 – сигнал сгустков, 2 – наведенное на резонатор без ВЧ ООС, 3 – наведенное напряжение на резонатор с ВЧ ООС.

Для проверки работы станции с ВЧ ООС на пучке были проведены контрольные измерения ее характеристик. Один из результатов представлен на рис.2. Здесь показаны сигналы (2, 3), наведенные пучком на два резонатора, настроенных на частоту следования сгустков (1). Использовался режим работы У-70, когда пучок циркулировал на бустерном плато магнитного поля. Из рисунка можно видеть, что декременты сигналов на резонаторах отличаются в 3 раза. Установленный петлевой коэффициент  $H=2$  снижает нагрузку пучком резонатора в 3 раза. Станция с ВЧ ООС удовлетворительно проработала ускорительный сеанс.

## Выводы

На основании полученных экспериментальных данных можно сказать, что для заметного уменьшения шунтового сопротивления в резонаторах ускоряющих станций У-70 необходимо динамически менять АЧХ и ФЧХ усилительного тракта. В этом случае запас устойчивости может быть обеспечен для петлевого коэффициента  $H \leq 5$  при удовлетворительной симметрии резонансной характеристики импеданса резонатора. Дальнейшее уменьшение шунтового сопротивления влечет за собой модернизацию всего усилительного тракта.

## Список литературы

- [1] Robinson K.W. CEA, Report no CEAL - 1010, 1964.
- [2] Pedersen F. IEEE, Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-32, No. 5, 1985, pp.2138-2140.
- [3] Garoby R., Jamsek J., Konrad P. et al. CERN/PS 89-28 (RF). March. 1989.
- [4] Гудков А.М., Сулыгин И.И., Шембель Б.К. Препринт ИФВЭ 80-135, Серпухов, 1980.
- [5] Лебедев О.П., Чубрик В.А. Препринт ИФВЭ 93-143, Протвино, 1993.