

# **Исследование перенапряжений в выходных каскадах системы ВЧ-питания резонаторов с трубками дрейфа линейного ускорителя ММФ**

А.И. Кваша

*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Линейный ускоритель Московской мезонной фабрики начал работать почти десять лет назад. В начальной части ускорителя установлены пять резонаторов с трубками дрейфа на частоте 198,2 МГц с уровнями импульсной мощности ВЧ-потерь в стенках  $\sim (1 - 2)$  МВт. Собственная добротность резонаторов достигает  $10^5$ , нагруженная (с учётом системы ВЧ-питания) примерно вдвое ниже, что соответствует измеряемой постоянной времени резонатора (50 — 60) мкс. Возбуждение каждого резонатора осуществляется с помощью жесткого коаксиального фидера длиной (25-30) метров от мощного выходного ВЧ-каскада на лампе ГИ-54А с импульсной анодной модуляцией. Для увеличения быстродействия модулятора, являющегося исполнительным органом быстродействующей системы стабилизации ускоряющего поля в резонаторе, разработан анодный модулятор с последовательным включением модуляторной лампы (ГМИ-44А) с нагрузкой — лампой ГИ-54А [1]. В фидере установлен мощный коаксиальный фазорегулятор ФР, совмещённый с переключателем резервного канала усиления.

Настройка системы ВЧ-питания с резонатором осуществляется по стандартной процедуре:

- система ВЧ-питания подключается к ВЧ-эквиваленту нагрузки и настраивается на максимум мощности;
- петля возбуждения предварительно настроенного резонатора подключается к согласованной (с волновым сопротивлением коаксиального фидера) нагрузке и связь резонатора с петлёй возбуждения изменяется вплоть до снижения добротности резонатора в два раза;
- резонатор подсоединяется к фидеру возбуждения и при включённой системе ВЧ-питания подстраивается (изменением температуры воды, охлаждающей трубки дрейфа резонатора) по минимуму сигнала отражённой волны в фидере.

Остаётся ещё одна степень свободы — фазовая длина фидера между резонатором и выходным каскадом системы ВЧ-питания. В условиях дефицита мощных высокочастотных и модуляторных ламп и устаревшего оборудования естественным является стремление использовать последнюю степень свободы для оптимизации режима выходного ВЧ-каскада. Однако совместная работа системы ВЧ-питания с быстродействующими системами стабилизации амплитуды и фазы ускоряющего ВЧ-поля в резонаторе и особенности импульсной работы ускорителя накладывают дополнительные требования к системе ВЧ-питания, выполнение которых возможно практически только с помощью подбора фазовой длины фидера возбуждения резонатора.

## **СВЯЗЬ МЕЖДУ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ СТАБИЛИЗАЦИИ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ**

Известно, что между быстродействующими системами стабилизации амплитуды и фазы ускоряющего поля, работающими в полярной системе координат (амплитуда и фаза), могут возникать перекрёстные обратные связи через исполнительные органы систем

авторегулирования, общий объект регулирования — резонатор и нагрузку — ускоряемый ток заряженных частиц [2]. Как правило, эти перекрёстные связи ухудшают устойчивость контуров систем авторегулирования, стабилизирующих амплитуду и фазу. Чаще всего приходится иметь дело с перекрёстными связями, возникающими из-за расстройки единой колебательной системы, состоящей из резонатора и выходного каскада системы ВЧ-питания. Действительно, как показано в работе [3], процессы установления ВЧ-поля в резонаторе могут описываться дифференциальным уравнением первого порядка для комплексной огибающей ВЧ-напряжения в контуре, эквивалентном резонатору:

$$T_n \frac{d\bar{U}_k(t)}{dt} + (1 + j\Delta\omega_{on} T_n) \bar{U}_k(t) = jQ_n \bar{E}_{in} . \quad (1)$$

Здесь  $T_k = 2Q_k / \omega_k$  — собственная постоянная времени резонатора;  $Q_k, \omega_k$  — собственные добротность и частота эквивалентного контура;  $T_n = T_k \frac{r_k}{r_k + r_{in}}$ , где  $r_{in}$  — сопротивление, «вносимое» из выходного каскада (ВК) системы ВЧ-питания в эквивалентный контур,  $r_k$  — сопротивление собственных потерь в контуре,  $\Delta\omega_{on} = \Delta\omega_o + \Delta\omega_{in}$ , где  $\Delta\omega_o$  — собственная расстройка резонатора,  $\Delta\omega_{in}$  — расстройка, «вносимая» из ВК в эквивалентный контур.

Величины  $r_{in}, \Delta\omega_{in}, \bar{E}_{in}$  являются функциями режима ВК, параметров промежуточных цепей между ВК и резонатором и связи резонатора с фидером [3]. Наличие расстройки  $\Delta\omega_{on}$  обуславливает наличие перекрёстных связей между быстродействующими системами стабилизации амплитуды и фазы ВЧ-поля [2], как правило, заметно ухудшающих статические и динамические характеристики этих систем. Поэтому помимо перечисленных выше условий настройки системы ВЧ-питания необходимо выполнить ещё одно:  $\Delta\omega_{on} = 0$ . Его можно выполнить или за счёт расстройки резонатора, или изменением параметров промежуточных цепей, в частности, изменением длины фидера возбуждения резонатора.

Расстройка резонатора приводит к нарушению режима согласования в фидере и к увеличению перенапряжений и ВЧ-потерь в фидере возбуждения резонатора. Поэтому предпочтительным и более эффективным способом является подбор длины фидера возбуждения. Из решения уравнения (1) следует, что при  $\Delta\omega_{on} = 0$  имеет место чисто экспоненциальный переходной процесс установления амплитуды при неизменной фазе. Поэтому при практической реализации условия настройки системы «ВК — резонатор» необходимо, изменением длины ФР, минимизировать амплитуду сигнала на выходе фазового детектора, индицирующего процессы установления фазы ВЧ-поля в резонаторе ускорителя. В ряде случаев только с помощью такой настройки удаётся добиться требуемой стабильности ускоряющего поля. Однако в процессе подбора длины фидера возбуждения (фазовая длина фидера изменялась почти на 180 град.), как правило, обнаруживаются такие участки длины фазового регулятора, где на заднем фронте ВЧ-импульса в анодном контуре ВК возникают выбросы ВЧ-напряжения, значительно превышающие рабочее напряжение и приводящие к пробоям. Иногда именно здесь и выполняются условия настройки системы в резонанс.

### **ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В АНОДНОМ КОНТУРЕ ВЫХОДНОГО КАСКАДА СИСТЕМЫ ВЧ-ПИТАНИЯ**

Причиной перенапряжений в анодном контуре ВК является «разряд» энергии, накопленной в высокодобротном резонаторе ускорителя, на анодный контур ВК через фидер возбуждения резонатора. При этом в контуре ВК на заднем фронте ВЧ-импульса может появляться ВЧ-напряжение, существенно превышающее рабочее напряжение при работе на резонатор. Это напряжение спадает с постоянной времени резонатора ускорителя и

сопровождается затухающими биениями с частотой, изменяющейся от десятков до сотен кГц. Именно наличие ВЧ-напряжения разряда резонатора может явиться и причиной перенапряжений на выходной лампе модулятора при её последовательном включении (по постоянной составляющей тока) с нагрузкой — лампой ВК. Отрицательный выброс, возникающий при этом в катоде модуляторной лампы и достигающий (60 - 70 %) от величины положительного модулирующего импульса, устраняется включением диодной сборки параллельно лампе ВК, как это сделано в модуляторе системы ВЧ-питания ММФ. С ВЧ-перенапряжениями в анодном контуре ВК ситуация более сложная; их величина определяется настройкой выходных цепей ВК — анодного контура и связи контура с фидером возбуждения резонатора, а также длиной этого фидера и может, при соответствующей настройке, привести к пробоям в анодном контуре ВК на заднем фронте ВЧ-импульса.

К сожалению, очень часто эта настройка совпадает с настройкой, соответствующей условию  $\Delta\omega_{on} = 0$ , что заставило более тщательно изучить процесс возбуждения контура ВК после окончания импульса модулятора. С этой целью были измерены собственные частоты контура ВК, нагруженного на резонатор, при снятом накале с лампы ГИ-54А и различной длине фазорегулятора в фидере возбуждения.

Результаты измерений для одного из каналов системы ВЧ-питания приведены на рис.1, где горизонтальная прямая соответствует рабочей частоте  $f_0 = 198,2$  МГц, а две другие зависимости — двум ближайшим собственным частотам анодного контура  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$ , величины которых из-за высокой добротности резонатора ускорителя в основном определяются длиной короткозамкнутого (со стороны резонатора) фидера возбуждения.

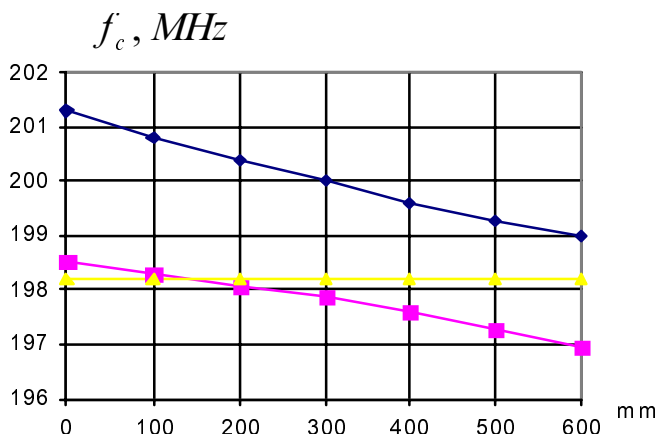


Fig.1 Resonance frequencies of the PA output cavity

Добротность анодного контура  $Q_c$  на частотах  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  составляет  $(4 - 5) \cdot 10^3$ , что практически на порядок превышает нагруженную добротность анодного контура  $Q_a$  при работе на резонатор на рабочей частоте 198,2 МГц в установившемся режиме. Следует отметить, что на положение приведенных зависимостей существенным образом влияют настройка анодного контура и величина связи контура с фидером возбуждения резонатора. Сопоставление результатов «холодных» измерений с измерениями перенапряжений, возникающих при определённых длинах фидера возбуждения резонатора, показывает, что последние достигают максимальной величины при приближении одной из частот  $f_{c1}$  или  $f_{c2}$  к рабочей частоте  $f_0$  и практически отсутствуют при выполнении условия:

$$f_0 = 0,5 (f_{c1} + f_{c2}). \quad (2)$$

Причём частота модуляции этого напряжения, обусловленная биениями между частотами  $f_0$  и ближайшей из частот  $f_{c1}$  или  $f_{c2}$ , также меняется от десятков кГц при приближении к опасной величине перенапряжений до сотен кГц при полном отсутствии перенапряжений, когда напряжение в контуре при «разряде» резонатора не превышает амплитуды рабочего ВЧ-напряжения при работе на резонатор ускорителя.

Расстояние между положениями фазорегулятора, соответствующими этим двум случаям, составляет примерно четверть длины волны. В качестве иллюстрации на рис.2 приведены рассчитанные зависимости относительных перенапряжений в контуре ВК ( $U_c(t)/U_c(0)$  – рабочее напряжение в контуре на плоской вершине ВЧ-импульса) при  $T_k = 10 T_c$ , где  $T_c$  – постоянная времени контура ВК на частоте  $f_c$  и трёх значениях  $2\pi (f_0 - f_c) T_c = 2, 5$  и  $10$ .

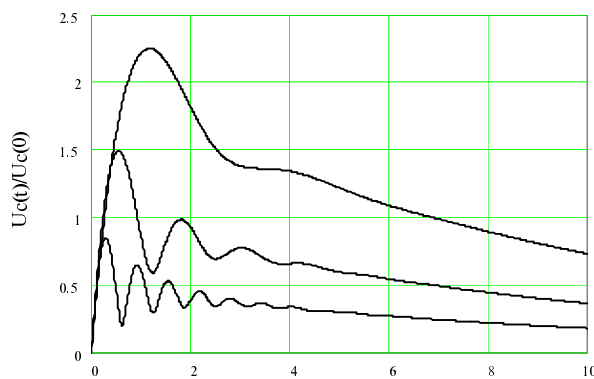


Fig.2. Power amplifier cavity transients

Приведенные зависимости качественно отражают процессы, которые имеют место на заднем фронте ВЧ-импульса в контуре ВК при изменении длины фидера ВЧ-возбуждения резонатора и параметров настройки анодного контура ВК. Следует отметить, что с аналогичными проблемами сталкиваются в системах ВЧ-питания, работающих в непрерывном режиме [4]. Здесь резонансы в фидере возбуждения могут явиться причиной самовозбуждения выходного каскада ВЧ-усилителя из-за увеличения усиления, обусловленного более высокой добротностью анодного контура ВК на частотах, соответствующих резонансам в короткозамкнутом (со стороны резонатора) фидере возбуждения резонатора. В работе [4] также предлагается использовать фазовращатель в фидере для того, чтобы с его помощью обеспечить выполнение условия (2) и тем самым максимально удалить опасные частоты паразитного самовозбуждения от рабочей частоты.

Следует отметить, что реально при наличии «горячей» (под накалом) лампы ВК процессы носят сугубо нелинейный характер. Так, по мере увеличения ВЧ-перенапряжений в контуре увеличивается ток через лампу ВК и, соответственно, мощность, рассеиваемая на аноде лампы, что, в частности, сказывается в заметном сокращении длительности заднего фронта огибающей ВЧ-поля в резонаторе.

Желание подбором фазовой длины фидера возбуждения резонатора улучшить характеристики быстродействующих систем стабилизации фазы и амплитуды приводит к необходимости поиска альтернативных путей снижения опасных перенапряжений в анодном контуре выходного каскада системы. Очевидным из них является сокращение длины фидера. В этом случае крутизна приведенных на рис.1 зависимостей и расстояние между ними возрастают, что приводит к снижению области фазовых длин фидера с опасными перенапряжениями в контуре ВК. В условиях завершённого сооружения ускорителя ММФ этот вариант является чисто гипотетическим.

Реально были апробированы два способа. В первом из них была исследована возможность более эффективного использования лампы ВК для рассеивания ВЧ-мощности, по-

ступающей из резонатора. Для этого сокращалась длительность ВЧ-импульса возбуждения лампы ВК на несколько десятков микросекунд таким образом, чтобы в течение этого интервала времени лампа ГИ-54А находилась под анодным напряжением уже после окончания ВЧ импульса возбуждения резонатора. Этот способ действительно позволил в ряде случаев снизить амплитуду ВЧ-напряжений в контуре в основном за счёт снижения постоянной времени спада ВЧ-поля в резонаторе и смещения момента возникновения собственных колебаний в контуре ВК на задний фронт импульса модулятора. К сожалению, этот способ не всегда может быть реализован из-за особенностей работы мощного генераторного триода ГИ-54А — наличия анодного напряжения без ВЧ-возбуждения зачастую является причиной внутривольного самовозбуждения, сопровождающегося резким увеличением анодного тока и пробоями в лампе.

Второй способ связан с изменениями настройки анодного контура ВК. Из-за более высокой добротности  $Q_c$  по сравнению с  $Q_a$  небольшими изменениями настройки анодного контура, особенно к.з. шлейфа, компенсирующего индуктивность петли связи ВК с фидером, удаётся в ряде случаев существенно уменьшить перенапряжения в контуре без заметного снижения к.п.д. выходного ВЧ-каскада.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.С.Черкашин и др. Результаты разработки импульсных модуляторов системы ВЧ-питания первой части ускорителя мезонной фабрики. Труды Радиотехнического института № 28, 1977 г., с. 60.
2. А.И.Кваша, Б.П.Мулин, Ю.Ф.Семункин. Структурное представление объекта регулирования системы стабилизации ускоряющего поля. Труды Радиотехнического института №28, 1977 г., с.95.
3. А.И.Кваша, Б.П.Мулин, Ю.Ф.Семункин. Быстродействующие системы стабилизации ускоряющего поля в резонаторах ускорителя «Мезонная фабрика». Труды Радиотехнического института № 20, 1977 г., с.73.
4. R.Hohbach. «Investigation on Stabilizing the 92 MHz, 150 kW Booster Amplifier», TRIUMF Design Note, TRI-DN-95-24, August 1995.