

Некоторые результаты работы нового мощного генераторного триода «КАТРАН» в выходных каскадах канала усиления начальной части ускорителя ММФ

А.И. Кваша, А.Г. Васильев,
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия
В.А. Пирогов, В.Д. Прокофьев,
АОЗТ «СЭД-СПб», Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Разработанная 30 лет назад в МРТИ АН СССР система ВЧ-питания начальной части ускорителя (НЧУ) Московской мезонной фабрики (ММФ) состоит из шести идентичных ВЧ-каналов усиления (включая резервный канал усиления), работающих в импульсном режиме на частоте 198,2 МГц. В настоящее время режим работы ускорителя с импульсным током пучка 12-14 мА и средним током до 140 мкА предполагает работу ВЧ-каналов усиления (КУ) с частотой повторения ВЧ-импульсов 50 Гц и длительностью 400 мкс.

На рис.1 приведена упрощенная схема ВЧ-канала усиления с элементами цепей авторегулирования, стабилизирующих ускоряющее ВЧ-поле в резонаторе ускорителя в системе полярных координат (амплитуда-фаза), и с указанием уровней импульсной ВЧ-мощности и величин напряжений и токов в цепях питания.

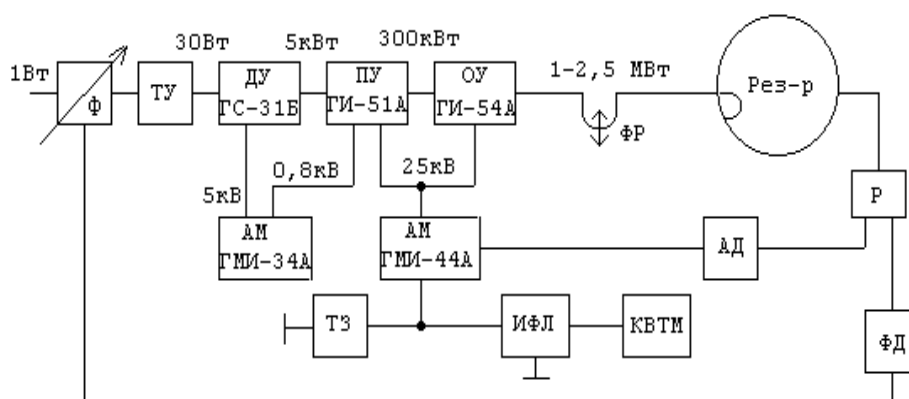


Рис.1. Схема ВЧ канала усиления начальной части ускорителя. Ф-фазовращатель, ТУ-транзисторный ВЧ усилитель, ДУ-двухкаскадный ВЧ усилитель, ПУ-предоконечный ВЧ усилитель, ОУ-оконечный ВЧ усилитель, АМ-анодный модулятор, АД-амплитудный детектор, ФД-фазовый детектор, Р-ВЧ разветвитель, ТЗ-тиристорная защита, ИФЛ-искусственная формирующая линия, КВТМ-высоковольтный выпрямитель, Рез-р-резонатор ускорителя, ФР-мощный фазорегулятор

В процессе почти десятилетней эксплуатации ускорителя выполнен большой объём работ, направленных на повышение надёжности работы каналов усиления НЧУ и продление срока службы мощных генераторных и модуляторных ламп [1].

Эти мероприятия позволили заметно улучшить эффективность работы ускорителя и увеличить срок службы мощных выходных ламп ГИ-51А, ГИ-54А и ГМИ-44А в среднем до 5-6 тыс. часов (гарантированный срок службы 1000 час.). Тем не менее, запасы этих ламп, созданные в 70-80-е годы, заметно уменьшились, а возобновление их производства в бывшем ОКБ «Светлана» (ныне АОЗТ «СЭД-СПб») в сегодняшней ситуации практически невозможно даже при наличии дополнительного финансирования. Особенно тяжёлая ситуация складывается с лампами ГИ-54А, запасы которых оказались меньше, а срок службы ниже, чем у остальных.

Предвидя эту ситуацию, в начале 90-х годов в ОКБ «Светлана» была проведена НИР (тема «Катран») по разработке нового современного мощного генераторного триода с основными выходными параметрами, соответствующими реальным режимам работы системы ВЧ-питания НЧУ ММФ. Оформление лампы – металлокерамическое с прямонакальным катодом, внешним анодом и водяным охлаждением всех электродов. Конструкция выходного промежутка анод-сетка разрабатываемого триода имеет импеданс, соответствующий импедансу выходного промежутка ГИ-54А, что позволяет использовать лампу «Катран» в анодном контуре оконечного каскада без переделки последнего. Управляющая сетка лампы изготовлена из традиционных тугоплавких материалов с нанесением эффективных антиэмиссионных покрытий, использующих плазменное нанесение карбида циркония с последующим нанесением платины.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАМП «КАТРАН» И ГИ-54А

В табл.1 приведены сравнительные характеристики ламп ГИ-54А и «Катран». Из сравнения параметров обеих ламп следует отметить, что наиболее заметные изменения имеют место в трёхкратном снижении уровня мощности, рассеиваемой на аноде лампы, и двукратном снижении усиления лампы «Катран» по сравнению с лампой ГИ-54А. В то же время заметно снижена мощность накала лампы «Катран», а за счёт перехода на переменное напряжение значительно упрощена реализация схемы питания накала.

Таблица 1.

№	Наименование параметра	Тип Прибора		Примечание
		ГИ-54А	«Катран»	
1	Питание накала Напряжение накала, не более Ток накала, не более	5,3 В, постоянное. 4,6 кА	~18 В, 50 Гц 1 кА	
2	Напряжение анода в импульсе, не более	40 кВ	35 кВ	
3	Мощность, рассеиваемая анодом, не более	400 кВт	120 кВт	На частоте 200 МГц
4	Выходная ВЧ-мощность в импульсе, не менее	5 МВт	3 МВт	В схеме с общей сеткой
5	Коэффициент усиления по мощности	25	8-12	При идентич- ных режимах
6	Межэлектродные ёмкости: Сетка-катод, пФ Анод-сетка, пФ Анод-катод, пФ	Не более 1000 Не более 120 Не более 1,5	250-400 70-100 1,5-5	

Наибольшие проблемы связаны со снижением усиления лампы «Катран», поскольку для получения требуемых уровней ВЧ-мощности в резонаторах ускорителя необходимо либо увеличивать мощность ВЧ возбуждения на входе оконечного каскада, либо поднимать усиление лампы «Катран» за счёт увеличения анодного импульсного напряжения. Поскольку с предоконечного каскада на лампе ГИ-51А не удаётся получать мощность выше 200–250 кВт, приходится повышать анодное напряжение на лампе «Катран» по сравнению с лампой ГИ-54А, причём величина этого превышения зависит от уровня выходной ВЧ-мощности и при Р_{имп} = 2 МВт может достигать 10-15 кВ (см. рис.2).

После завершения НИР по теме «Катран» в 1992 году работы с новой лампой в ОКБ «Светлана» были приостановлены, поскольку финансирования ОКР-а добиться не удалось. Однако испытания опытных образцов ламп «Катран», изготовленных в рамках НИР, были продолжены в аппаратуре ускорителя ММФ в составе резервного канала усиления, который мог подключаться к любому из резонаторов ускорителя [1] и, таким образом, позволял проверить работу новой лампы на любом из резонаторов. Всего до 1997 года проведены испытания (включая круглосуточную работу в пучковых сеансах) четырёх образцов ламп «Катран», которые позволили с оптимизмом взглянуть на возможность их использования в системе ВЧ-питания ускорителя ММФ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЛАМП «КАТРАН»

Испытания ламп проводились в два этапа. На первом этапе КУ подключался к ВЧ-эквиваленту нагрузки (ЭН), установленному в районе размещения аппаратуры КУ №1. На рис.2 приведены зависимости ВЧ-мощности, измеренные в ВЧ ЭН, для лампы ГИ-54А и одного из экземпляров лампы «Катран» при одном и том же возбудителе (предоконечном каскаде усиления). Из этих зависимостей следует, что при имеющемся возбудителе получение требуемых уровней мощности возможно при заметном увеличении анодного напряжения. Кроме того, при имеющемся возбудителе лампа «Катран» в принципе не обеспечивает выходную импульсную ВЧ-мощность 3 МВт даже при максимальном анодном напряжении 35 кВ.

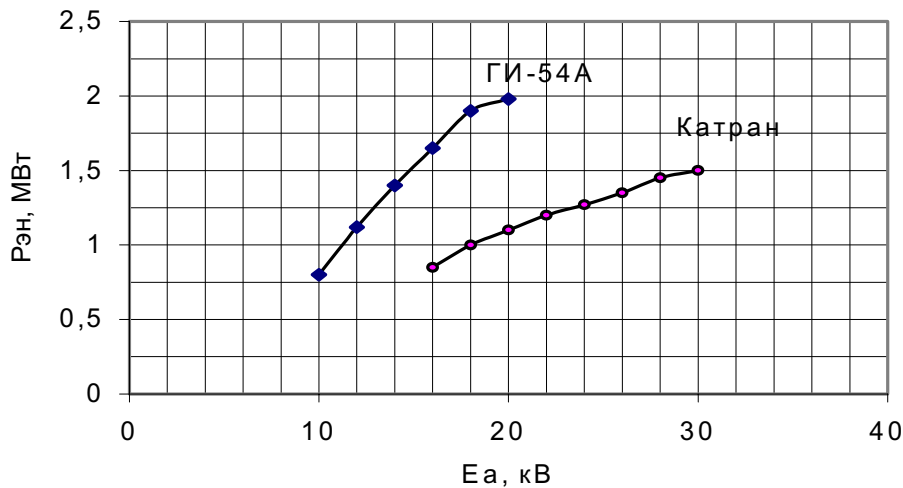


Рис. 2. Зависимости выходной ВЧ-мощности канала усиления с лампами ГИ-54А и «Катран» при работе на ВЧ-эквивалент нагрузки.

Точность измерения ВЧ-мощности с помощью калориметрического ВЧ-эквивалента нагрузки довольно низкая, тем более, что ЭН расположен в районе КУ №1 и между резервным КУ, где установлена лампа «Катран» и ЭН, размещены пять фазорегуляторов с КСВН $\sim 1,5$. Поэтому более эффективным способом оценки характеристик новой лампы является её работа на реальную нагрузку – резонатор ускорителя.

На этом этапе резервный КУ с лампой «Катран» подключался к различным резонаторам НЧУ с помощью переключателей, совмещённых с мощными фазорегуляторами в фидерах возбуждения резонаторов [2]. При этом в отличие от работы на ВЧ ЭН при подключении КУ к резонатору имелась возможность оптимизировать режим работы окончного ВЧ-каскада за счёт регулировок положения мощного ФР в фидере возбуждения того КУ, вместо которого подключался резервный КУ с лампой «Катран», а также связи фидера возбуждения с резонатором. Результаты работы резервного КУ с лампами «Катран» на резонаторы ускорителя НЧУ приведены в табл.2.

Таблица 2.

№	№ рез.	Римп, МГВт	Рср. КВт	Iао А	Iкo А	Еаo КВ	Траб. час	Причина выхода из строя
1	1	1,2	25	160	200	24	400	Потеря электропрочности
2	1	1,2	25	150	200	24	1500	Потеря эмиссии
3	2,3	2	40	190	210	30	900	Потеря эмиссии
4	ВЧЭН	1,5	25	160	210	26	150	Повторная установка

Все четыре лампы были восстановлены в «СЕД-СПб» и возвращены в ИЯИ для дальнейших испытаний. Одна из восстановленных ламп уже проработала в составе штатного КУ №5 (на уровне выходной импульсной ВЧ-мощности 0,9–1 МВт) около 3000 часов без заметного ухудшения своих параметров. В настоящее время подготовлены детали и узлы для перевода на лампу «Катран» ещё двух каналов усиления.

В процессе испытаний была проверена также возможность регулирования выходной ВЧ-мощности за счёт управления величиной ВЧ-возбуждения на входе лампы «Катран». Как известно, лампа ГИ-54А устойчиво работает только в перенапряжённом режиме с управлением выходной мощностью за счёт регулирования анодного напряжения.

Проведенные испытания показали возможность управления лампой «Катран» как по аноду (в перенапряжённом режиме), так и по сетке (при постоянном анодном напряжении), причём в последнем случае диапазон регулирования выходной мощности при $E_{a0} = 30$ кВ достигает 7–8 дБ. Этого вполне достаточно для построения более эффективной системы стабилизации ускоряющего ВЧ-поля с регулированием на низком уровне ВЧ-мощности и, в частности, современной системы стабилизации в декартовых (I/Q) координатах [3]. Следует иметь в виду, что из-за работы лампы оконечного усилителя с углом отсечки регулирование по ВЧ возбуждению сопровождается изменением постоянной составляющей тока лампы «Катран» (I_{a0}), что в свою очередь приводит к изменению анодного напряжения, снижающего эффективность регулирования по возбуждению. Уменьшить реакцию модулятора на изменение нагрузки можно, в частности, за счёт введения цепи отрицательной обратной связи с выхода анодного модулятора на вход подмодулятора [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в ИЯИ РАН многолетние испытания нового мощного генераторного триода показали, что эта лампа может заменить собой лампу ГИ-54А при минимальных переделках аппаратуры системы ВЧ-питания ускорителя ММФ, если требуемые уровни выходной импульсной ВЧ-мощности не превышают 1–1,5 МВт. В том случае, когда требуется большая мощность приходится рассматривать вариант уموощнения предоконечного каскада, например, за счёт перехода на другую лампу. В настоящее время рассматривается вариант замены лампы ГИ-51А в предоконечном усилителе на лампу ГИ-57А. Ожидается, что такая замена позволит в 1,5–2 раза увеличить мощность ВЧ-возбуждения лампы «Катран» и, соответственно, повысить её выходную ВЧ-мощность при допустимых величинах анодного напряжения. При положительных результатах этой работы будет не только решена проблема полного перехода на лампу «Катран», но и проблема замены лампы ГИ-51А, выпуск которой также прекращён, на серийно выпускаемую лампу ГИ-57А.

Следует отметить, что отсутствие финансирования ОКР лампы «Катран» не позволяет завершить комплекс конструкторско-технологических работ в «СЭД-СПб» по окончательной доводке и оптимизации параметров лампы.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.K.Esin, A.I. Kvasha, L.V. Kravchuk. "Moscow Meson Factory DTL RF System Upgrade". – Proc. of the 1995. PAC and ICHEA Conf., May 1-5, 1995, Dallas, Texas, p. 1175.
2. Н.И. Уксусов, Б.И. Поляков, Б.В. Романов. «Коаксиально-фидерные системы линейного ускорителя мезонной фабрики». – Труды Радиотехнического института АН СССР, №28, М., 1977, стр.70.
3. S.P. Jachim . «Some New Methods of RF Control» Proc. of the Linear Accel. Conf., pp. 573-576, 1990.
4. А.И. Кваша, В.И. Рогачёв, Ю.С. Черкашин «Система стабилизации амплитуды ВЧ-поля в первой части ускорителя мезонной фабрики». – Труды У1 Всесоюзного совещ. по ускор. зар. частиц, Дубна, 1978 .