

# Опыт эксплуатации и модернизация анодного модулятора системы ВЧ-питания начальной части ускорителя ММФ

С.А. Давыдов, Л.Н. Казанский, А.И. Кваша, Ю.М. Лопатников  
Институт ядерных исследований РАН, Дубна, Россия

## ВВЕДЕНИЕ

Мощные анодные модуляторы системы ВЧ-питания начальной части (НЧУ) ускорителя Московской мезонной фабрики обеспечивают импульсное анодное питание выходных ВЧ-каскадов шести каналов усиления с амплитудой импульсов 15-20 кВ, током 150-250 А при длительности импульсов 300-400 мкс и частоте повторения 50-100 Гц. В качестве разрядника в модуляторе используется управляемая по сетке лампа ГМИ-44А с последовательным включением нагрузки – лампы ГИ-54А выходного ВЧ-каскада. Накопителем энергии является искусственная формирующая линия (ИФЛ) с волновым сопротивлением  $W_{\lambda}$  около 24 Ом, работающая в рассогласованном режиме ( $R_n/W_{\lambda} = 4-5$ , где  $R_n$  – сопротивление по постоянной составляющей тока лампы ГИ-54А) с частичным разрядом емкостей линии [1]. Использование ИФЛ вместо конденсаторной батареи, с одной стороны, позволяет сократить количество конденсаторов и ограничить токи при пробоях в последовательно соединённых лампах ГМИ-44А и ГИ-54А. С другой, из-за падения напряжения на волновом сопротивлении ИФЛ при открывании лампы ГМИ-44А напряжение на конденсаторах ИФЛ на несколько кВ выше, чем в случае использования конденсаторной батареи.

На рис.1 приведена упрощённая схема модулятора с подмодулятором, цепей ВВ-питания и трёх цепей обратной связи, охватывающих подмодулятор, резонатор и модулятор.

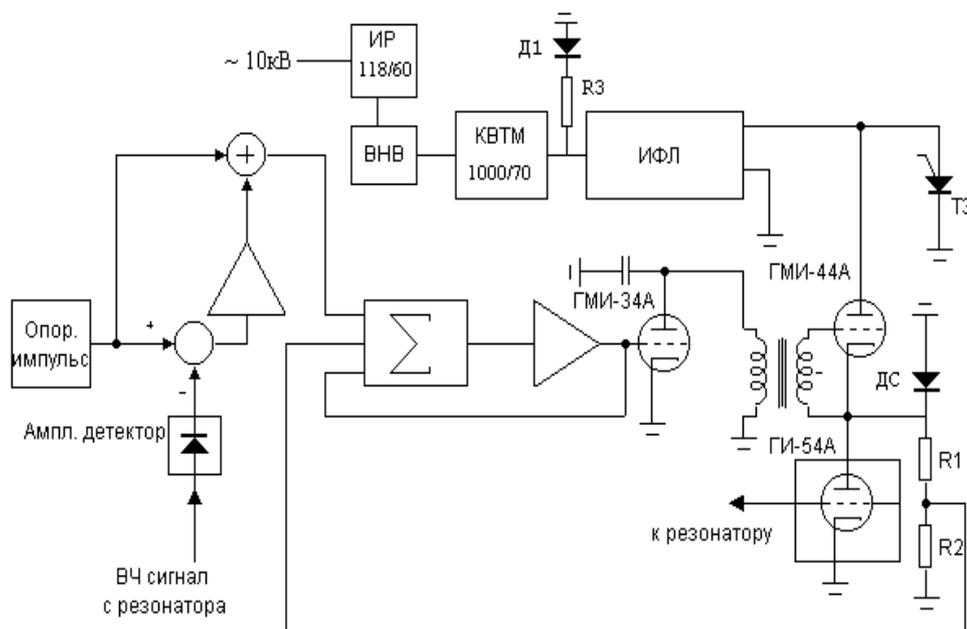


Рис.1. Упрощенная схема модулятора с цепями ВВ-питания и обратными связями, охватывающими резонатор и модулятор.

Здесь ИР 118/60, ВНВ и КВТМ 1000/70 – трёхфазные индукционный регулятор, вакуумный выключатель и выпрямитель, соответственно, ТЗ – устройство быстродействующей тиристорной защиты, предназначенное для разряда ИФЛ при пробоях в мощных модуляторной (ГМИ-44А) и усилительной лампах. Параллельно нагрузке модулятора – выходному каскаду ВЧ-усилителя, подключена диодная сборка (ДС), предназначенная для срезания отрицательного выброса на заднем фронте импульса модулятора. Появление отрица-

тельного выброса связано с разрядом ВЧ-энергии, накопленной в высокодобротном резонаторе ускорителя, на анодно-сеточный контур выходного ВЧ-усилителя и перезарядом ёмкости в аноде лампы ГИ-54А постоянной составляющей тока лампы. Резисторная сборка R3 определяет переходные процессы в ИФЛ после срабатывания ТЗ.

## 1. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДУЛЯТОРА

В процессе более чем десятилетней эксплуатации анодных модуляторов пришлось столкнуться с рядом проблем, являющихся как следствием ошибочных решений, принятых при разработке модулятора, так и выявленных во время наладочных работ и продолжительных пучковых сеансов при одновременной работе всех шести каналов усиления.

Так, предусмотренное проектом охлаждение электродов лампы технической водой приводило к образованию накипи в анодном бачке и каналах охлаждения лампы ГМИ-44А после 2-3 тыс. часов работы. Процедура механического удаления накипи, как правило, заметно сокращала срок службы лампы. В свою очередь одноступенчатое включение накала лампы ГМИ-44А приводило к недопустимо большим броскам тока накала в момент включения, следствием чего могло быть разрушение катодного узла лампы.

Параметры ИФЛ и устройства ТЗ были выбраны таким образом, что после запуска ТЗ тиристоры оставались открытыми даже после полного разряда ИФЛ. При этом возникает режим короткого замыкания для выпрямителя КВТМ, возрастают электродинамические усилия в индукционном регуляторе ИР, в результате чего развивается крутящий момент на валу ротора ИР, приводящий к срезанию защитных шпилек и кратковременному или полному (если, например, часть срезанной шпильки попадает между ротором и статором ИР) выходу из строя ИР. Для исключения подобных ситуаций проектом предусмотрена цепь отключения ВНВ через 20-25мс после срабатывания ТЗ. Надёжность этой цепи оказалась недостаточно высокой и в течение 10 лет полностью вышли из строя четыре индукционных регулятора.

При длительности импульса модулятора  $T_{и}$  меньшей постоянной разряда линии  $T_{р}$  в ИФЛ возникали затухающие колебания с частотой, равной  $1/T_{р}$ , и с максимальной амплитудой до 5-6 кВ (см. рис.2). Эти колебания могут быть источником помех для блока запуска ТЗ и приводить к ложным срабатываниям ТЗ, поскольку уровень запускающих ТЗ сигналов составлял 2-3 В и блок запуска ТЗ располагался в помещении ИФЛ.

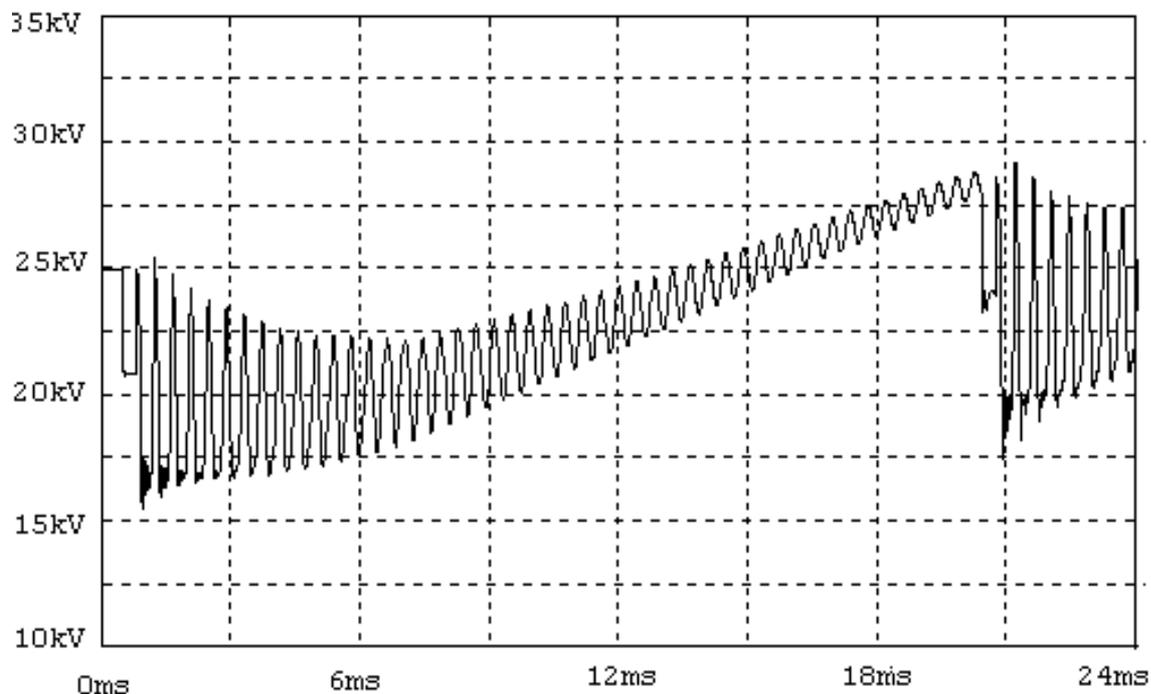


Рис.2. Переходные процессы установления напряжения в ИФЛ при  $T_{и} = 300$  мкс,  $T_{р} = 400$  мкс

Диодная сборка ДС, размещаемая в помещении ИФЛ, соединена 50-метровым ВВ кабелем с катодом лампы ГМИ-44А (анодом лампы ГИ-54А). Этот кабель создавал дополнительную емкостную нагрузку для лампы ГМИ-44А, снижая быстродействие модулятора, и являлся источником помех для цепей запуска ТЗ, которые могут поступать из выходного ВЧ-каскада КУ по кабелю ВВ-питания лампы ГИ-54А.

Ламповый подмодулятор, с выхода которого импульсы поступают на вход лампы ГМИ-34А (см. рис.1), оказался очень энергоёмким, ненадёжным и узкополосным (верхняя частота полосы пропускания составляет 200-300 кГц). Последнее заметно влияет на качество быстродействующей системы авторегулирования, стабилизирующей амплитуду ВЧ-поля в резонаторе.

Всё вышеперечисленное, а также размещение оборудования в различных зданиях на расстояниях в десятки метров друг от друга и отсутствие разделённых контуров для заземления силовой и измерительной аппаратуры, явились причиной неустойчивой и ненадёжной работы модуляторов. В первых пучковых сеансах средняя наработка на отказ системы ВЧ-питания НЧУ не превышала 1 часа, причём большая часть отключений носила групповой характер, вплоть до одновременного отключения всех пяти КУ (шестой КУ для резонатора RFQ начал работать в 1997 году). Если учесть, что из-за длительного процесса ввода ВЧ- мощности в резонаторы НЧУ, связанного с большим уровнем ВЧ-потерь в стенках резонатора, восстановление работы ускорителя после каждого отключения КУ занимает 10-20 минут [2], то становится ясно, что в такой ситуации ни о какой серьёзной работе ускорителя не могло быть и речи.

## 2. МОДЕРНИЗАЦИЯ МОЩНОГО АНОДНОГО МОДУЛЯТОРА

Работы по модернизации модулятора были направлены как на улучшение условий эксплуатации и соответствующее увеличение срока службы лампы ГМИ-44А, так и на повышение надёжности и устойчивости работы модулятора в целом. В связи с этим в течение нескольких лет был осуществлён перевод охлаждения электродов ламп ГМИ-34А и ГМИ-44А во всех каналах усиления с технической на дистиллированную воду, что наряду с введением двухступенчатого режима включения лампы накала ГМИ-44А позволило почти вдвое увеличить срок ее службы.

Особое внимание было уделено повышению надёжности и помехоустойчивости работы цепей ТЗ. С помощью программы Micro-CapV были промоделированы переходные процессы в ИФЛ после срабатывания ТЗ и определено сопротивление резисторной сборки  $R3 = 27 \text{ Ом}$ , при котором в результате перезаряда линии, через время, равное  $2T_{гр}$ , на тиристорах появляется отрицательное запирающее напряжение величиной 5-6 кВ, в результате чего происходит “автоматическое” восстановление готовности ТЗ. Результаты экспериментальной проверки подтвердили правильность модели и проведенных на ней расчётов, что дало основания для внесения соответствующих изменений во все модуляторы системы ВЧ-питания НЧУ. В течение последних четырёх лет ни одного случая выхода из строя индукционных регуляторов не наблюдалось. Для повышения помехоустойчивости ТЗ в блоке запуска ТЗ были установлены дополнительные фильтры и в несколько раз повышен порог срабатывания ТЗ. Кроме того, были приняты меры по предотвращению прохождения сигналов помех из выходных ВЧ-каскадов на вход блока запуска ТЗ. С этой целью диодная сборка ДС была перенесена непосредственно к нагрузке модулятора – выходному ВЧ-каскаду. При этом почти на 10 тыс. пФ уменьшилась ёмкость в катоде лампы ГМИ-44А, и была ликвидирована цепь прохождения ложных сигналов запуска ТЗ из выходного ВЧ-каскада.

Для снижения колебаний во время заряда ИФЛ поддерживалось равенство длительностей импульса модулятора и разряда ИФЛ, например, за счёт отключения части ячеек ИФЛ, если возникала необходимость работы с длительностью ВЧ-импульса меньшей, чем длительность разряда ИФЛ.

Разработана новая схема транзисторного подмодулятора с полосой регулирования до 2 МГц с уровнем входного сигнала, поступающего из цепи обратной связи системы стабилизации амплитуды ускоряющего поля, порядка единиц вольт (см. рис.3)

В представленной схеме на вх.1 поступает сигнал обратной связи из системы стабилизации амплитуды, на вх. 2 – тестовый сигнал при автономной настройке подмодулятора, на вх. 3 – импульс запуска транзисторного ключа (на транзисторах Q5, Q6), открывающего вход подмодулятора на длительность рабочего импульса, на вх. 4 – сигнал обратной связи с выхода модулятора (делитель R1, R2 на рис.1). Следует отметить, что введение отрицательной обратной связи (ООС), охватывающей модулятор, помимо расширения полосы модулятора и связанного с этим повышения качества быстродействующей системы стабилизации ускоряющего поля, открывает возможность построения более эффективной системы стабилизации с регулированием по ВЧ-возбуждению на низком уровне ВЧ-мощности.

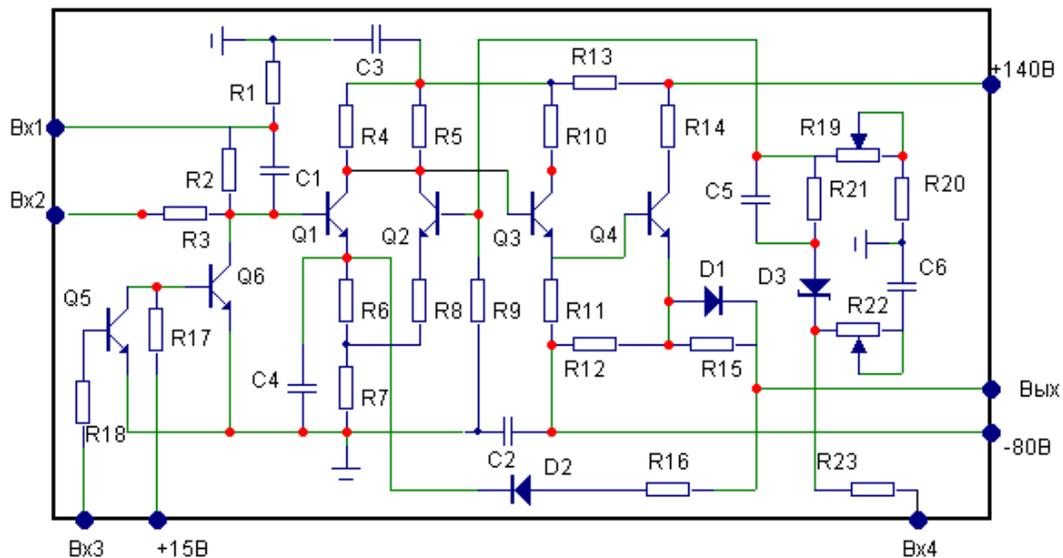


Рис.3. Принципиальная схема транзисторного подмодулятора. На схеме Q1, Q2 – КТ604БМ, Q3 – КТ505А, Q4 – КТ854А, Q5, Q6 – КТ315А.

Обратная связь снижает зависимость амплитуды импульса модулятора от величины нагрузки – постоянной составляющей тока лампы выходного ВЧ-каскада, которая меняется в процессе регулирования по возбуждению из-за работы лампы выходного каскада с отсечкой анодного тока. Кроме того, как показали измерения, введение ООС на порядок и более снижает чувствительность амплитуды импульса модулятора к нестабильности питающей сети. К настоящему времени новый транзисторный подмодулятор установлен в аппаратуре всех шести мощных анодных модуляторов и за время двухгодичной эксплуатации показал себя с самой лучшей стороны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанные в ИЯИ РАН работы, направленные на улучшение качества и повышение надёжности системы импульсного питания лампы выходного ВЧ-каскада, позволили существенно улучшить работу системы ВЧ питания и ускорителя в целом, а именно:

заметно увеличился срок службы мощной выходной лампы модулятора ГМИ-44А – с 3-4 до 5-6 тыс. час, что особенно важно сейчас, когда выпуск этих ламп прекращён;

значительно уменьшилось количество отключений модулятора как из-за выхода из строя аппаратуры модулятора, так и из-за ложных срабатываний тиристорной защиты. Благодаря этому общая наработка на отказ системы ВЧ-питания увеличилась более чем на порядок – с одного часа до 15-17 часов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.С. Черкашин и др. «Результаты разработки импульсных модуляторов системы ВЧ-питания первой части ускорителя мезонной фабрики». Труды Радиотехнического института №28, М., 1977, стр.60.
2. А.И. ваша и др. «Особенности ввода ВЧ-мощности в резонаторы ускорителя ММФ». Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 13-15 окт. 1992, т.2, с.222.