

Катодный модулятор предварительного триодного СВЧ-усилителя канала ВЧ-питания линейного ускорителя ММФ

В.Н. Леонтьев, В.В. Пеплов, С.И. Шараментов
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Введение

На линейном ускорителе ММФ в настоящее время ведутся работы по его реконструкции с целью повышения средней интенсивности пучка протонов. На начальном участке ускорителя в канале транспортировки пучка от инжектора ко входу первого резонатора типа Альвареца устанавливается дополнительный RFQ-резонатор, ускоряющий протоны от 400 до 750 кэВ. В этом случае будет существенно снижено рабочее напряжение инжектора и облегчен режим его работы, что позволит увеличить длительность импульса инжектируемого пучка от 80 мкс до 150–180 мкс.

Для дальнейшего ускорения пучка необходимо обеспечить соответствующую длительность импульса стабилизированного ВЧ-поля в резонаторах, которая определяется параметрами системы ВЧ-питания ускорителя.

Структура и основные параметры системы ВЧ-питания представлены в [1]. В состав каналов ВЧ-питания резонаторов основной части с рабочей частотой 991 МГц входят предварительный двухкаскадный триодный СВЧ-усилитель и окончательный клистронный усилитель. Импульсный режим работы усилителей обеспечивается соответствующими анодными модуляторами. Параметры рабочего импульса модулятора предварительного усилителя следующие: амплитуда импульса – до 3 кВ, длительность импульса – до 130 мкс. Анодный модулятор клистрона вырабатывает импульс амплитудой до 80 кВ и длительностью до 180 мкс. Частота повторения 10; 50; 100 Гц. Таким образом, очевидно, что максимальная длительность импульса ВЧ-поля определяется параметрами модулятора триодного усилителя, и величина его стабилизированной плоской части с учетом фронтов и переходных процессов при работе системы авторегулирования не превышает 120 мкс.

Решению задачи увеличения длительности импульса ВЧ-поля в резонаторах основной части ускорителя посвящена представленная работа.

Схема с анодной модуляцией

Рассмотрим подробней схему и возможности существующего анодного модулятора предварительного усилителя.

Штатный модулятор предварительного усилителя выполнен по схеме линейного накопителя с тиристорным управлением зарядом и разрядом искусственной линии, собранной из 13 LC звеньев. Резонансный заряд ее осуществляется от выпрямителя через дроссель до напряжения 400–600 В. Разряд происходит через разрядный тиристорный ключ и первичную обмотку импульсного трансформатора, имеющего коэффициент трансформации $n=10$. Задний фронт импульса формируется защитным тиристорным ключом, который также служит для снятия напряжения с нагрузки в случае ее пробоя. Для обеспечения хорошей линейности плоской части импульса применена схема с опорным конденсатором, срезающая на заданном уровне его верхнюю часть. Питание опорного конденсатора осуществляется от высоковольтного выпрямителя.

Выходной импульс модулятора амплитудой 2–3 кВ подается на блок усилителя СВЧ-мощности, выполненный на металло-керамических триодах типа ГС-34-1. В блоке используются два идентичных каскада, собранных по схеме с общей сеткой. Усилительные каскады резонансного типа с настраиваемыми контурами. Режим ламп устанавливается автоматическим смещением с помощью резисторов в катодных цепях.

Два каскада обеспечивают на выходе блока мощность до 500 Вт в импульсе при входной мощности порядка 5 Вт. В процессе многолетней эксплуатации триодных усилителей с анодной модуляцией были выявлены недостатки схемы и проведены многочисленные схемные и конструктивные доработки для повышения надежности и стабильности работы ВЧ-канала. Однако при работе с таким способом управления, существует ряд принципиальных проблем, которые перечислены ниже.

1. Анодный модулятор представляет собой схему с высоким напряжением и мощными сильноточными цепями, элементы которых интенсивно нагреваются в процессе работы, что снижает надежность функционирования аппаратуры.
2. Для эффективного использования энергии, запасенной в формирующей линии, необходимо хорошее согласование сопротивления нагрузки модулятора с волновым сопротивлением линии. При замене ламп, перестройке контуров каскадов согласование нарушается, что приводит к изменению режима работы усилителя и требует настройки корректирующих цепей модулятора.
3. Полная энергия, запасенная в формирующей линии, определяется количеством LC-звеньев. При регулировке длительности рабочего импульса, которая производится с помощью сдвига момента запуска защитного тиристорного ключа, запасенная энергия используется не полностью, так как принудительный разряд линии через первичную обмотку импульсного трансформатора заканчивается раньше ее естественного полного разряда. КПД схемы при этом снижается.
4. Подрезка вершины импульса с помощью опорного конденсатора также энергетически невыгодна, так как энергия верхней срезанной части импульса не используется.
5. Сбои импульсов запуска, происходящие при работе мощных каналов ВЧ-питания вследствие появления помех, часто приводят к «залипанию» тиристорных ключей, развитию больших токов, возникновению перегрузки выпрямителя и аварийному отключению канала.
6. При работе модулятора с частотой повторения 100 Гц и при искажениях питающей сети заряд линии может происходить до разного уровня напряжения от импульса к импульсу. В результате наблюдается «двоение» вершины импульса модулятора и выходного импульса ВЧ-огнивающей, что приводит к появлению дополнительной нестабильности амплитуды ВЧ-поля в ускоряющем резонаторе.
7. Максимальная длительность импульса модулятора определяется количеством LC-звеньев линии и в нашем случае не превышает 130 мкс. Добавление дополнительных звеньев не приводит к существенному увеличению длительности из-за насыщения импульсного трансформатора, используемого в данной схеме, и решить задачу удлинения ВЧ-огнивающей до 200 мкс не удается.
8. В процессе эксплуатации часто происходили пробой конструктивных кольцевых разделительных конденсаторов в каскадах ламп, что связано с воздействием на них импульсного высокого напряжения. Это потребовало специальных разработок по изменению конструкции и выбору материала для изготовления конденсаторов, а также, в целях повышения долговечности, уменьшения уровня высокого напряжения с 3 до 2 кВ с некоторой потерей диапазона динамического регулирования амплитуды ВЧ-сигнала.

Для решения задачи увеличения длительности ВЧ-импульса предварительного усилителя до 200 мкс и устранения существующих проблем, а также для повышения надежности функционирования аппаратуры системы ВЧ-питания предложена схема с низковольтной катодно-сеточной модуляцией в триодных каскадах.

Рассмотрим новую предложенную схему модуляции и оценим ее преимущества.

Схема катодного модулятора

Для определения основных параметров схемы катодного модулятора предварительно были сняты статические характеристики ламп ГС-34-1. Измерения показали, что при постоянном напряжении на аноде величиной +3 кВ уровень положительного запирающего напряжения между катодом и сеткой в схеме с заземленной сеткой составляет несколько десятков вольт. Ток через открытую лампу в рабочем режиме не превышает 1 А.

Схема, осуществляющая катодную модуляцию, показана на рис. 1. Мощные транзисторные ключи подключены к катодам ламп, на которые постоянно подано запирающее напряжение +50 В. Ключи управляются от формирователя импульса, собранного на TTL микросхемах [2]. При открывании ключей катоды ламп соединяются с землей схемы через резисторы катодного автосмещения R_k , обеспечивая тем самым открывание ламп. Схема формирователя позволяет регулировать длительность отпирающего импульса в любых пределах. Максимальная длительность ограничивается допустимой рассеиваемой мощностью на анодах ламп, условиями их охлаждения и мощностью анодного выпрямителя.

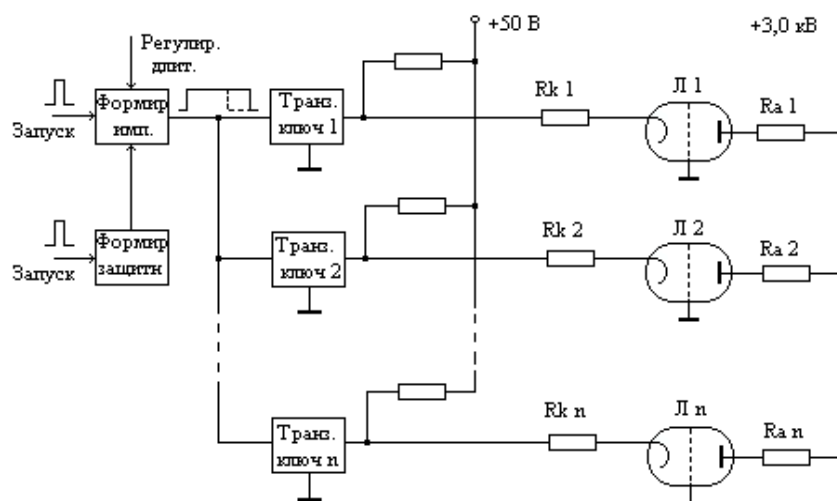


Рис. 1. Блок-схема катодного модулятора.

Разработанная схема модулятора содержит формирователь обрыва импульса при аварийных пробоях в ВЧ-тракте, схему измерений катодного тока в каждом каскаде и схему защиты нагрузки в случае аварии в цепях питания. Источниками питания модулятора служат штатные блоки напряжением +12,6 В и +50 В, нагрузкой являются усиленные ВЧ-каскады. На аноды ламп через токоограничивающие сопротивления R_a подается постоянное высокое напряжение величиной до +3 кВ.

Сравнивая два способа импульсной модуляции, можно выделить следующие достоинства схемы с катодно-сеточным управлением.

1. Катодный модулятор представляет собой маломощную низковольтную схему, поэтому практически отсутствует нагрев его элементов во время работы.
2. Резко сокращены размеры схемы. В отличие от массивного блока анодного модулятора с крупногабаритными деталями, катодный модулятор собран на одной компактной плате.
3. При одинаковых параметрах выходного ВЧ-импульса схема более экономична с точки зрения потребления по сети 220 В 400 Гц, так как не имеет холостых потерь.
4. Схема позволяет нагружать выход модулятора на любое количество каскадов. Согласования сопротивлений, как в схеме с формирующей линией, не требуется. Ограничением служит только мощность источников питания.

5. Рабочий импульс катодного модулятора стабилен и не зависит от частоты повторения, поэтому исключена возможность «двоения» ВЧ-оггибающей, и режим работы системы стабилизации более устойчив.
6. Схема позволяет оперативно изменять и устанавливать любую длительность импульса. Ограничением является мощность существующего высоковольтного источника питания и допустимая мощность рассеяния ламп типа ГС-34-1.
7. Схема работает при постоянном напряжении на анодах ламп, что более благоприятно для высоковольтных разделительных конденсаторов в анодных контурах по сравнению с импульсным режимом. Проблема пробоев конденсаторов практически отсутствует. При этом можно вновь повысить высокое напряжение на анодах до 2,5–3,0 кВ для увеличения коэффициента усиления и расширения диапазона динамического регулирования в канале.
8. Рабочий импульс модулятора имеет практически идеальную прямоугольную форму с крутыми передним и задним фронтами и плоской ровной вершиной.
9. Помехоустойчивость данной схемы выше в связи с отсутствием сильноточных тиристорных ключей и других мощных цепей.

Результаты эксплуатации схемы катодного модулятора

На каналах ВЧ-питания линейного ускорителя ММФ в настоящее время изготовлено и смонтировано шесть катодных модуляторов для предварительных СВЧ-усилителей. Реализованный вариант схемы содержит по два ключа для управления двумя каскадами с возможностью регулирования длительности импульса в пределах от 120 до 210 мкс. Платы расположены непосредственно в блоках СВЧ-усилителей вблизи каскадов.

Из состава штатного блока анодного модулятора в схеме используются высоковольтный выпрямитель с накопительной емкостью, имеющий выходное напряжение +2,5 кВ, и цепи, обеспечивающие защиту при перегрузке выпрямителя и пробое нагрузки. В блоке СВЧ-усилителя предусмотрена блокировка высоковольтного источника при пропадании постоянного напряжения запирающего +50 В на катоде лампы. Изменена конструкция катодных узлов каскадов в связи с выносом сопротивлений автосмещения на плату модулятора.

Проведенная проверка работы предварительного усилителя в составе ВЧ-канала с длительностью импульса 200 мкс на частоте повторения 100 Гц показала возможность схемы успешно работать в предельных режимах. Однако при этом наблюдается спад вершины импульса ВЧ-оггибающей на выходе усилителя величиной 5–7%. Это связано с малой величиной накопительной емкости в источнике высокого напряжения. Дальнейшее увеличение длительности импульса в исполненном варианте схемы ограничено мощностью трансформатора высоковольтного выпрямителя.

Потребление электроэнергии усилителем с катодной модуляцией уменьшилось на 50%.

Катодные модуляторы в триодных усилителях проработали во время последних трех сеансов работы ускорителя с пучком несколько сотен часов и показали свою стабильность и надежность. Уже в настоящее время при существующих параметрах модулятора клистрона, на участке ускорителя с набором энергии пучка до 160 МэВ возможно получать импульс ускоряющего поля в резонаторах длительностью до 170 мкс. Дальнейшее увеличение длительности связано с модернизацией мощного анодного модулятора клистрона и с возможностями самого клистрона.

Список литературы

1. Высокочастотные устройства ускорителей заряженных частиц. Труды Радиотехнического института АН СССР, №28. Москва, 1977.
2. А.Г.Алексенко, Е.А.Коломбет, Г.И.Стародуб. Применение прецизионных аналоговых микросхем. Москва, «Радио и связь», 1985.