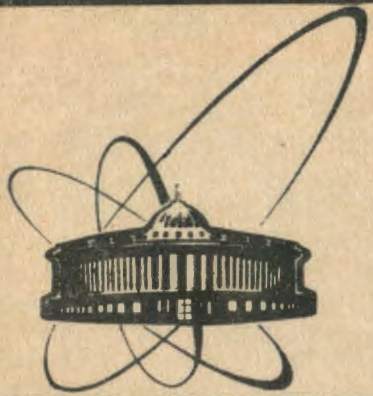


89-355

е
7



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

Ш 35

P9-89-355

В. А. Швец

К ВОПРОСУ О МОДЕРНИЗАЦИИ
УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛИУ-30

1989

Ускоряющая система ЛИУ-30 состоит из индукционной, импульсной и фокусирующей систем^{/1/}. В работе рассматриваются вопросы модернизации и усовершенствования этих систем, которые позволяют существенно улучшить параметры ускорителя.

В индукционной системе основным элементом является ускорительная секция. Для инжекторного участка она состоит из 12 индукторов, а для пяти ускорительных участков - из 14. Первичные обмотки индукторов соединены параллельно и питаются от одного импульсного генератора /т.н. модулятора/, разделенного на две секции, а вторичные, роль которых играет пучок ускоряемых электронов, - последовательно.

Основное требование, предъявляемое к ускоряющей системе ЛИУ, - темп ускорения электронов, выражающийся в приросте энергии частиц на единицу длины. В ЛИУ-30 он составляет в среднем 180 кэВ/м и является достаточно низким по сравнению с существующими ускорителями этого класса^{/2/}. В начальной же стадии ускорения, когда энергия электронов еще мала, необходимо иметь значительный больший прирост энергии на единицу длины из-за недопустимости развития когерентных колебаний. Кроме того, для ряда физических исследований повышение суммарной энергии электронов после прохождения того же количества секций имело бы существенное значение.

Возможны два пути повышения ускоряющего напряжения на секции. Первый заключается в применении двойной формирующей линии в импульсном генераторе и требует двойного по отношению к проектному количества конденсаторов К75-35 емкостью 10-24 тыс. пФ с напряжением 50 кВ. Кроме того, двойная формирующая линия, как известно, дает колоколообразную форму импульса, в которой отсутствует плоская вершина ускоряющего импульса, что отрицательно сказывается на монохроматичности электронного пучка.

Во втором варианте при том же количестве конденсаторов К75-35, установленных в проектном модуляторе, используется второй тиратрон, зарезервированный для параллельной работы в случае перегрузки первого.

Для реализации схемы повышения ускоряющего напряжения необходимо:

а/ Включение в импульсной системе половины формирующей линии и второго тиратрона с его системой запуска, накала и генера-

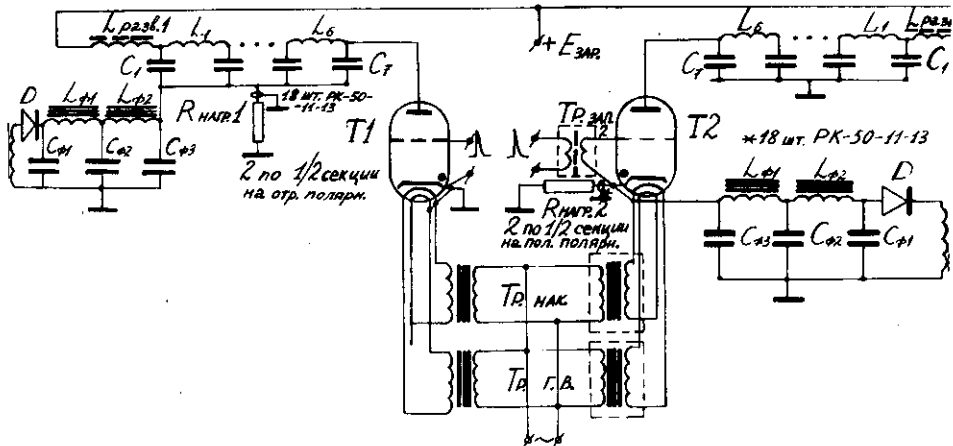


Рис. 1. Импульсная система ЛИУ-30 /пояснения в тексте/.

тора водорода на положительную полярность выходного импульса /рис.1/;

б/ В индукционной системе осуществление схемы чередующейся полярности питания половин индукторов /в соответствии с двухполярной схемой генератора и униполярного размагничивания для каждой половины индуктора/ и общей заземленной средней точки корпуса индукторов для обоих каналов генератора /рис.2/.

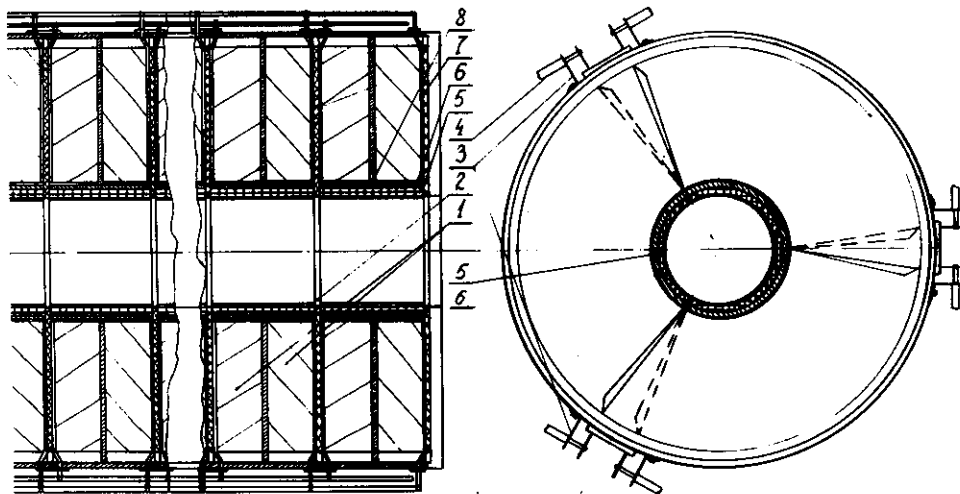


Рис. 2. Индукционная и фокусирующая системы ЛИУ-30.

Для осуществления схемы повышения ускоряющего напряжения были взяты две основные ускорительные секции. Между индукторами 1 секции /рис.2/ в местах соприкосновения их витков возбуждения 7 разной полярности устанавливались прокладки из стеклотекстолита 2 толщиной 3 мм. На корпус секции, который, в отличие от проектного, находящегося под половиной импульсного напряжения модулятора, в этом случае был под нулевым потенциалом, монтировались 6 шин 3 для заземления оплеток кабелей 4 импульсной системы обеих полярностей питания индукторов. Трансформаторы тока размагничивания, размещенные в модуляторе на обе полярности, соединялись первичными обмотками параллельно, а во вторичные обмотки включались последовательно мощные выпрямительные диоды на 300 А в направлении проводимости, противоположном соответствующей полярности генератора. Система LC-фильтров от высокого импульсного напряжения в цепях размагничивания потребовала пересчета и наладки.

Расчет системы фильтрации высокого напряжения в цепях размагничивания /одинаковых на обе полярности/ проводился методами четырехполюсников: 1-я ступень предназначена для фильтрации частоты фронта импульса и имеет параметры $L_{\phi 1} = 160$ мкГн, $C_{\phi 1} = 1000$ пФ, $C_{\phi 2} = 8200$ пФ; 2-я ступень контуров предназначена для фильтрации частоты вершины импульса и имеет параметры $L_{\phi 2} = 20$ мГн, $C_{\phi 3} = 8$ мкФ. Измерение импульсной наводки в цепях показало приемлемое значение остаточного напряжения секции, не выходящего за предельно допустимые для диодов В320.

Кабели питания 4 секций от импульсной системы типа РК-50-11-13 по 18 шт. от каждой формирующей линии обеих полярностей модулятора разделялись на шесть пар шин в каждой секции /рис.2/. С другой стороны кабелей они разделены на две группы /рис.1/, подключаемые к общей шине конденсаторной батареи первого тиратрона для отрицательной полярности импульса /обычная схема/ и катоду второго тиратрона для положительной. Для вторичных обмоток трансформаторов /обведены пунктиром/ питания накала и генератора водорода второго тиратрона были изготовлены специальные маслonaполненные компактные каркасы с изоляцией на 50 кВ из оргстекла. Трансформатор запуска для второго тиратрона на положительную полярность, вторичная обмотка которого подключается между катодом и его сеткой, также разделяющий, как и предыдущие трансформаторы, напряжение 50 кВ, выполнен на ферритовом кольце ϕ 80 мм внутренним проводником с изоляцией от коаксиального кабеля РК 50-4-11. Число витков - /6:10/ подобрано экспериментально.

Экспериментальная настройка заключалась в подборе, в соответствии с расчетами, параметров формирующих линий, цепей размагничивания, нагрузочных сопротивлений секций. В результате

наладки получены следующие параметры: длительность импульса на уровне $0,9 \tau_{и} = 400$ нс, амплитуда напряжения на секции при $U_{зар.} = 19$ кВ составляла 450 кВ, что \approx в 1,7 раза выше проектного. Испытания проводились на частоте 12,5 Гц, кратковременно /до 0,5 часа/ включалась частота 25 Гц. Ограничения накладывались только со стороны теплового режима нагрузочных сопротивлений секций.

Рассмотрим теперь вопросы, связанные с фокусирующей системой ЛИУ-30. По проекту на инжекторном участке с энергией около 3 МэВ удержание поперечных размеров пучка осуществлялось как внутрисекционными фокусирующими элементами соленоидального типа, так и межсекционными короткими фокусирующими линзами, питаемыми от стабилизированных источников постоянного тока. Величина поля достигала 300-400 Э. На ускорительных участках проектом предусматривались дискретные фокусирующие линзы на торцах секций, причем число их на ускорительных участках с ростом энергии электронов уменьшалось.

Однако в первых же экспериментах на ЛИУ-30 в 1982-84 гг. оказалось необходимым устранить провалы в поле в межсекционных промежутках инжекторного участка и установить дополнительные линзы на первом ускорительном участке. Количество их тем не менее оказалось явно недостаточным, поэтому предлагалось два варианта: 1/ изготовить второй инжекторный участок с применением сплошного фокусирующего поля, как и в первом; 2/ в секциях первого ускорительного участка установить дополнительные фокусирующие линзы вместо некоторых индукторов.

В качестве альтернативы первому варианту разработчиком было предложено в секциях ускорительных участков установить сплошные импульсные соленоиды /однорядные, длиной, как и секция, 1,7 м/. Однако индуктивность их оказалась очень велика, крутизна нарастания тока малой, и этот вариант был разработчиком же отвергнут.

Для реализации второго варианта, основанного на применении постоянноточных фокусирующих линз, оказалось невозможным получить поле до 2 кЭ в условиях обычного охлаждения. Кроме того, просчитывался тиратронный вариант питания импульсных соленоидов, которые предполагалось выполнить широкой лентой для достижения малой длительности импульса /20-50 мкс/. Этот вариант менее перспективен с точки зрения больших напряжений, необходимых для тиратронных схем, поэтому наиболее подходящими оказались тиристорные схемы. Нами разработаны импульсные катушки, рассчитанные на поле 1400 Э при токе 100 А (14 Э/А) длительностью импульса 5 мкс, напряжением импульсной системы до 400 В. Число витков - 160, с проводом ϕ 2 мм при среднем диаметре катушки 120 мм и осевой протяженности ее 100 мм, ин-

дуктивность - 1,6 мГн. На основе макетов четырех источников были изготовлены 64 блока импульсного питания. В процессе наладки на ускорителе они подвергались изменениям и модернизации. Окончательные параметры блоков следующие: $\tau_{и} = 10$ мкс, /для накопительной емкости блока 4000 мкФ и индуктивности импульсной катушки, изготовленной разработчиком, $L = 5,48$ мГн/, $I_{имп.} = 140$ А, $U_{имп.} = 270$ В. Кратковременно /до 90 мин/ можно устанавливать ток 160-170 А. Ограничение связано с работоспособностью конденсаторов К50-17 по отрицательному послеимпульсу, который необходим для закрытия ключа-тиристора, но из-за большой индуктивности катушки достигает 70-100 В в зависимости от рабочего тока. Его амплитуду можно уменьшить путем введения в разрядную цепь тиристор - конденсатор - катушка диода с ограничивающим резистором, и другими мерами.

Конструктивно импульсная система питания выполнена в виде четырех стоек типа "Вишня" на один ускорительный участок. В каждой стойке размещается 16 блоков БПИ-400, блок синхросигналов БСС, 5 блоков опорных напряжений БП-3-15 и БП-6-25, цифровое управление. Рядом со стойкой смонтированы выпрямитель и зарядные сопротивления с вентилятором. Каждый блок соединяется со своим фокусирующим элементом кабелем РК-50-11-13.

Недостатком импульсных систем фокусировки остается большая индуктивность катушки и связанное с этим достаточно большое значение накопительной емкости, а следовательно, рост длительности импульса и потребляемой мощности, что накладывает существенные ограничения на повышение рабочей частоты по тепловому режиму.

Поэтому была разработана новая импульсная фокусирующая система внутрисекционного типа, макет которой прошел испытания и дал следующие результаты: накопительная емкость импульсного блока 90 мкФ, рабочее напряжение 900 В, импульсный ток 1 кА, импульсное магнитное поле в центре на оси 3 кЭ, число витков фокусирующего элемента - 28, длительность импульса 250 мкс, индуктивность соленоида 60 мкГн, мощность, выделяющаяся в катушке при частоте 50 Гц, - 6 кВт. Элемент выполняется полым медным проводом прямоугольного сечения 4×8 мм² с каналом охлаждения $2 \times 6 = 12$ мм², сечение по меди 20 мм². Провод наматывается в два слоя по 14 витков в каждом и имеет осевую длину 112 мм при внутреннем диаметре 120 мм, наружном - 136 мм. Фокусирующий элемент новой импульсной системы позволит решить одновременно две задачи:

А/ осуществить формирование сплошного импульсного магнитного фокусирующего поля на участках 1-5 ЛИУ-30, не требуя для своей реализации радикальной реконструкции существующих ускорительных секций.

Установка фокусирующих элементов в ускоряющий элемент ЛИУ-30 /индуктор/ показана на рис.2. Здесь обычные шины питания 7 из нержавеющей стали /полосы $\approx 400 \times 18 \times 1,5$ мм/, соединяемые на общем кольце 8 $\phi 40 \times 50$ мм в середине корпуса индуктора, заменяются цилиндром 6 $\phi 140 \times 2 \times 120$ мм, к которому приварены прямые отрезки шин 7 для вывода их через изоляторы из слюдо-терма, установленные снаружи корпуса индуктора. Цилиндр 6 устанавливается в корпусе индуктора на месте срезанного кольца 8, прикрепляется к корпусу винтами и служит центрирующим устройством и одновременно бандажом для фокусирующего элемента 5. Поскольку в новом варианте сборки секции корпус ее заземляется, можно исключить два стеклотекстолитовых кольца-изолятора толщиной по 26 мм, расположенных на торцах. За счет этого образуется дополнительный промежуток длиной 52 мм, разделяемый на 14 частей, так что расстояние между корпусами сердечников увеличивается до 8-10 мм. Это позволяет вывести охлаждаемые витки фокусирующих элементов без дополнительного соединения /внутри по воде/ наружу из секции, повернув на 90° /"пропеллером"/ провод 4×8 мм² из плоскости намотки в плоскость между сердечниками. Возможны и другие варианты.

Применяя в накопительной емкости импульсного блока три-четыре конденсатора типа К75-46 80 мкФ \times 1000 В, новые транзисторы в зарядной части импульсного блока с током до 10 А и напряжением 1 кВ типа КТ838-КТ839, можно соединять фокусирующие элементы по 3-4 параллельно, не увеличивая количества блоков питания на участок, и после их незначительной модернизации осуществить реализацию сплошного фокусирующего поля.

Б/ обеспечить благодаря малой индуктивности фокусирующих элементов работу ускорителя на более высоких частотах, т.к. существенно облегчен тепловой режим.

Таким образом, осуществив предложения по реконструкции импульсной, индукционной и фокусирующей систем ускорителя, можно уже на имеющихся участках повысить темп ускорения и улучшить условия формирования и проводки пучка без потерь. Причем эти работы можно проводить, не нарушая режима работы ускорителя, изготовив комплект заменяемых и вновь устанавливаемых элементов для одного модулятора, двух секций, шести-восьми импульсных блоков фокусировки, на стенде секций и, проведя комплексную наладку ускоряющей системы этого комплекта аппаратуры, устанавливать секции, узлы модуляторов, импульсные блоки фокусировки на штатные места в ЛИУ-30.

В заключение автор благодарит К.П.Сигаева за разработку и наладку импульсного питания блоков, С.В. Солодова, В.Н.Клочкова за помощь при монтаже и доводке эксплуатационных парамет-

ров, В.А.Кулькова, В.Н.Клочкова - за участие в проведении экспериментов по повышению ускоряющего напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анцупов П.С. и др. - Препринт НИИЭФА, № А-0213, Ленинград, 1974.
2. Матора И.М. и др. - Препринт ОИЯИ, Р9-5268, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 мая 1989 года.