

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-515

P9-96-515

А.В.Андросов, В.К.Антропов, А.М.Долгов, А.А.Каминский,
В.И.Константинов, А.К.Красных, Г.М.Куперман*,
Э.М.Лазиев, И.М.Мартынов, Ю.А.Метелкин, В.А.Сенюков,
В.А.Тимохин, В.И.Фурман, В.А.Швец

СТАТУС И СОСТОЯНИЕ СТЕНДА И СТЕНДОВЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ГОЛОВНОГО ОБРАЗЦА
МОДУЛЯТОРА КЛИСТРОНА 5045 (SLAC)
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУЭ-200
УСТАНОВКИ ИРЕН ЛНФ ОИЯИ

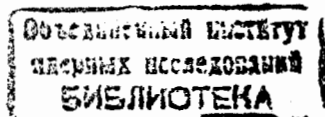
*РИМР, Санкт-Петербург

1. Введение

В Лаборатории нейтронной физики начато проектирование и создание интенсивного импульсного нейтронного источника, состоящего из линейного ускорителя электронов и нейтронной размножающей мишени (проект ИРЕН) [1]. Совокупность выходных параметров этого нейтронного источника уникальна. Он заменит существующую установку ИБР-30, состоящую из линейного ускорителя электронов ЛУЭ-40 и подкритической сборки из делящегося материала, находящуюся в эксплуатации в ОИЯИ уже около четверти века. В основу проекта ИРЕН положена та же структурная схема установки, но с новыми линаком ЛУЭ-200 и современной размножающей мишенью. Для реализации проекта очень важно, что во многом может быть использована существующая инфраструктура старого нейтронного спектрометра (нейтроноды, экспериментальные залы и павильоны), а также существующее здание комплекса ИБР-30 + ЛУЭ-40. Проект линака основан на лучших мировых достижениях в области ускорительной техники. Темп набора энергии в ЛУЭ-200 должен составлять около 35 МэВ/м, частота повторения импульсов - 150 Гц при средней мощности в пучке 12 кВт. Указанный темп набора энергии всего на 30% меньше экспериментально достигнутого в КЕК [2]. В ЛУЭ-200 используются самые мощные в своем классе импульсные клистроны типа 5045 и система умножения мощности (SLED), разработанные для Стенфордского электрон-позитронного коллайдера, Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), а также современные ускоряющие секции, изготавливаемые в Новосибирске.

Для экспериментальной проверки проектных параметров, а также для отработки основных систем ускорителя, в ЛНФ ОИЯИ создается полномасштабный стенд на основе одного клистрона 5045, системы умножения мощности, волноводного фидера и одной ускоряющей секции. Клистрон 5045 вместе с импульсным трансформатором, СВЧ-нагрузкой и некоторым вспомогательным оборудованием приобретен ОИЯИ ранее.

Поскольку в России отсутствуют клистроны с параметрами,



близкими к параметрам клистрона 5045, то не существует и модуляторов на соответствующую импульсную мощность. Поэтому возникло предложение о модификации разработанных ранее модуляторов М-250 на базе станции ОЛИВИН в более мощные импульсные модуляторы М-350. В ЛНФ начата работа по созданию модулятора М-350 с импульсной мощностью 150 МВт, средней мощностью 150 кВт, зарядным напряжением 50 кВ, частотой повторения импульсов 150 Гц, длительностью плоской части импульса 3,5 мкс и использованием отечественной элементной базы. К началу работ по созданию стенда ОИЯИ приобрел также комплект оборудования станции ОЛИВИН из ЕрФИ.

Программа работ на стенде предусматривает исследование модулей и подсистем, входящих в систему СВЧ-питания ЛУЭ-200, с их паспортизацией (аттестацией) перед монтажом на ускорителе в зд. 43. Будут отработаны также современные системы защиты клистрона от нештатных ситуаций, диагностики и отклонений от номинального режима работы. Эти работы будут выполнены с учетом опыта эксплуатации оборудования Стенфордского линейного коллайдера.

В данной работе основное внимание уделено описанию полномасштабного стенда и первым результатам по созданию и исследованию узлов модулятора М-350.

2. Общее описание стенда модулятора клистрона 5045 (SLAC).

В состав стенда входят:

- устройство высоковольтного питания, включающее трансформаторную подстанцию ТП-118/3 с высоковольтным выпрямителем ВТМ-35/200, автотрансформатором РТТМ-250/0,5, конденсаторную батарею КБ и реактивный ограничитель зарядного тока (зарядный дроссель) ЕРОМ-100/0,5;
- модулятор М-350 {состоящий из сдвоенной формирующей линии с сосредоточенными параметрами, разрядного тиратрона ТГИ1-5000/50 ("Исполин") и системы стабилизации}; клистрон 5045 (SLAC) с импульсным трансформатором;

- волноводный тракт (В.Тр.) от клистрона к ускоряющей секции;
- ускоряющая секция (УС);
- вакуумная система (ВС);
- пульт управления (ПУ), система диагностики (СД), синхронизатор (С), теплообменная установка дистиллированной воды, система СВЧ-питания, блокировок, управления, защиты и сигнализации. В состав стенда входят также системы автоматизации измерений и контроля параметров ускорительного оборудования на базе персонального компьютера (РС).

Блок-схема стенда представлена на рис. 1.

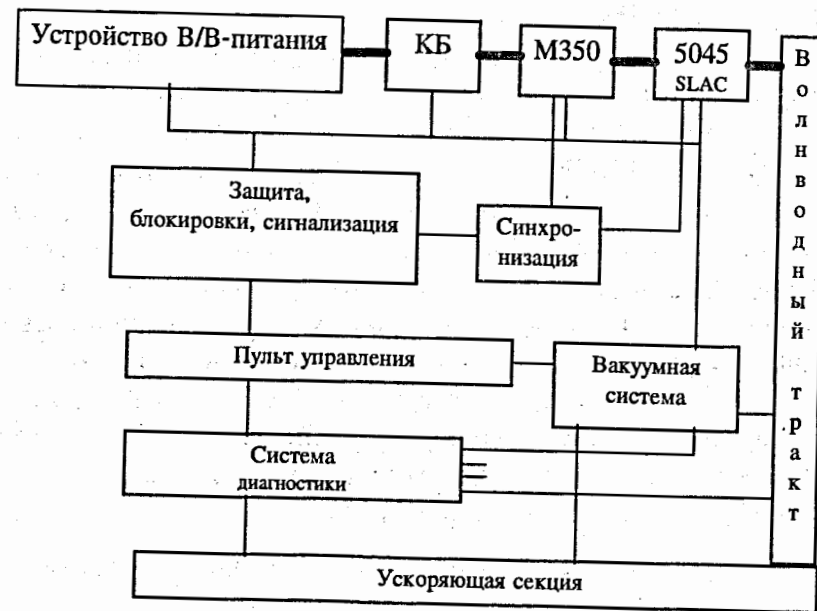


Рис. 1. Блок-схема стенда модулятора клистрона 5045 (SLAC).

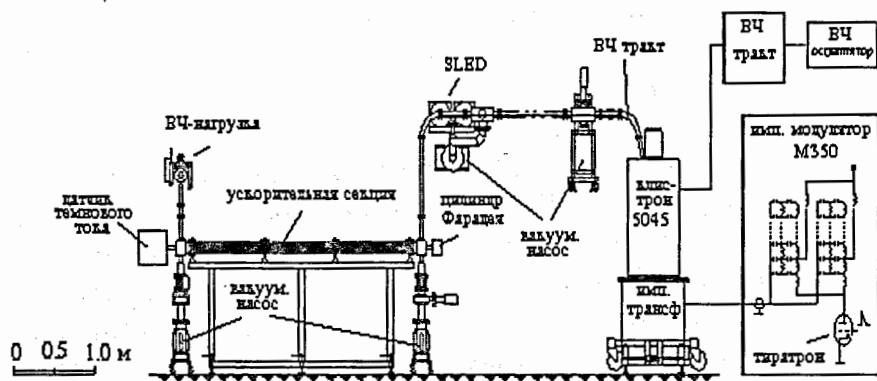


Рис. 2. Компонировочная схема стенда.

3. Модулятор М-350

Наиболее близким аналогом по требуемой импульсной мощности и освоенным промышленностью модулятором может служить модулятор М-250, разработанный в Российском институте мощного радиостроения (РИМР), С.-Петербург, для клистронной усилительной станции ОЛИВИН [3]. Однако по частоте повторения импульсов и по выходной импульсной мощности модулятор не пригоден к прямому использованию для питания клистрона 5045. Поэтому применение клистронной импульсной станции ОЛИВИН, полученной из ЕрФИ, Армения, возможно только после существенной переработки импульсной части ее модулятора М250, включая систему стабилизации, для того, чтобы можно было использовать промышленную нестабилизированную сеть ОИЯИ для питания модулятора М-350.

Параметры импульсных модуляторов М-250 и М-350 приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что модуляторы М-250 и М-350 отличаются наиболее значительно по следующим параметрам:

- по импульсной мощности в нагрузке - отличие в 2 раза;
- по частоте повторения импульсов и средней мощности - в 1,5 раза;

- по длительности выходного импульса - отличие в 2,3 раза в пользу М-250.

Таблица 1. Параметры импульсных модуляторов М-250 и М-350

№№	Наименование параметра	М-250	М-350
1.	Импульсная мощность, МВт	65	150
2.	Номинальное напряжение на клистроне, кВ	250	350
3.	Номинальное импульсное напряжение на выходе формирующей линии, кВ	20	23,5
4.	Номинальный импульсный ток, кА	3,6	6,3
5.	Коэффициент трансформации импульсного трансформатора	13,6	15
6.	Длительность рабочей части импульса, мкс	8	3,5
7.	Длительность фронта импульса по уровням 0,1-0,9, не более, мкс	1,5	1,0
8.	Длительность среза импульса по уровням 0,1-0,9, не более, мкс	2,7	1,8
9.	Неравномерность вершины импульса, не более, %	±0,15	±0,5
10.	Частота повторения импульсов, Гц	100	150
11.	Суммарная емкость конденсаторов формирующей линии, мкФ	1,05	0,7
12.	Волновое сопротивление линии, Ом	4	4
13.	Номинальное напряжение заряда конденсаторов формирующей линии, кВ	40,0	47,0
14.	Номинальное среднее значение тока зарядки конденсаторов формирующей линии, А	4,2	5
15.	Мощность, потребляемая от сети (ориентировочно), кВА	150	200

Значения перечисленных параметров определяются источником питания, цепью зарядки, но в большей степени формирующим устройством, которое для М-350 должно быть разработано заново. В то же время многие узлы (например, устройство зарядки

накопителя и т.п.) могут быть использованы в М-350 без переделок либо с незначительной доработкой.

Известно, что формирующее устройство в значительной степени определяет стоимость импульсного модулятора и его основные эксплуатационные характеристики.

Основным узлом формирующего устройства является формирующая линия (ФЛ). Выбору элементов формирующей линии (но на другой элементной базе) для модулятора клистрона 5045 значительное внимание уделено в [5], где проанализированы различные конструкции формирующей линии, а также конденсаторы с различными типами диэлектриков и различной технологией их изготовления.

Однако окончательный выбор типа конденсаторов для ФЛ-модулятора М-350 авторы [5] не сделали. Не представляется возможным использовать без предварительных испытаний конденсаторы типа ИМК-100-0,5, которыми укомплектована формирующая линия модулятора М-250. Тем не менее применение именно этих конденсаторов для М-350 нам кажется перспективным, несмотря на их значительную собственную индуктивность. В настоящее время разработана, спроектирована и находится в стадии изготовления формирующая линия на базе конденсаторов ИМК-100-0,5.

На стенде будут проведены всесторонние испытания формирующей линии, и будет принято заключение о возможности использования конденсаторов ИМК-100-0,5 в модуляторе М-350. На этой же формирующей линии будут отрабатываться варианты конструктивного исполнения другого важнейшего ее звена - высоковольтных импульсных катушек с регулируемой индуктивностью (вариометров). Использование вариометров М-линии модулятора М-250, разработанных в РИМРе для применения в станции ОЛИВИН и в других отечественных генераторах СВЧ-мощности, по нашему мнению, является дорогостоящим вариантом. Более простые регулируемые индуктивности по типу L-линии, которые будут иметь в перспективе также дистанционное управление, разработаны и изготавливаются нами в ЦОЭП

ЛНФ. Эта же формирующая линия будет использована для отработки новых устройств и способов формирования плоской вершины импульса с малым уровнем пульсаций (до 0,5% и менее).

И, наконец, к первоочередным исследованиям на стенде модулятора клистрона SLAC мы относим исследования и отработку схем и устройств защиты тиратрона и клистрона от выбросов обратного напряжения (клипперные цепи); схем заряда емкостных накопителей формирующей линии; диагностической аппаратуры модулятора М-350.

Эти дорогостоящие меры защиты аппаратуры от преждевременного выхода из строя продиктованы, во-первых, большой частотой следования импульсов (150 Гц), а во-вторых, необходимостью увеличения срока службы и надежности элементов модулятора.

3.1. Исследование зарядной схемы формирующей линии модулятора

М-350.

Конденсаторы формирующей линии $C_{фл}$ заряжаются резонансно по схеме удвоения напряжения.

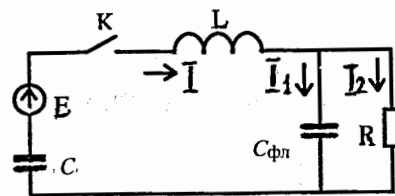


Рис. 3. Эквивалентная схема зарядной цепи

Расчетная эквивалентная схема зарядной цепи представлена на рис.3,

где С - накопительная конденсаторная батарея, заряженная до напряжения Е от высоковольтного источника постоянного напряжения ($C=12\text{мкФ}$); $C_{фл}$ - эквивалентная емкость формирующей линии модулятора ($C_{фл} = 0,7\text{ мкФ}$); L - индуктивность зарядного дросселя ($L = 3,5\text{ Гн}$); К — диодный коммутатор,

который включается в нулевой момент времени и отключается при достижении максимального напряжения на конденсаторе $C_{фл}$. Предварительно заряженный конденсатор C представлен как незаряженный конденсатор, соединенный последовательно с источником постоянного зарядного напряжения E . Ток I_2 учитывает утечку заряда через сопротивление R изоляции формирующей линии.

3.2. Уравнение для напряжения на формирующей линии

Входное операторное сопротивление схемы рис. 4 относительно точек a и b имеет вид

$$Z(p) = \frac{RLC_{фл}}{p(1+pR C_{фл})} \left(p^3 + p^2 \frac{1}{R C_{фл}} + p \frac{C+C_{фл}}{LC C_{фл}} + \frac{1}{RLC C_{фл}} \right)$$

Напряжение на ФЛ, нормированное на единицу,

$$\frac{U_{фл}(p)}{E(p)} = \frac{1}{L C_{фл}} \frac{1}{p^3 + p^2 \frac{1}{R C_{фл}} + p \frac{C+C_{фл}}{LC C_{фл}} + \frac{1}{RLC C_{фл}}}$$

Переходя от изображения функции к оригиналу и представляя корни полинома в виде

$$p_1 = a, \quad p_2 = \alpha - i\beta, \quad p_3 = \alpha + i\beta,$$

закон изменения напряжения на конденсаторах ФЛ (как функцию времени) можно представить в виде:

$$\frac{U_{фл}}{E} = \frac{1}{LC_{фл}[(a-\alpha)^2 + \beta^2]} \left[e^{at} - e^{\alpha t} \left(\frac{a-\alpha}{\beta} \sin \beta t + \cos \beta t \right) \right]$$

Напряжение на $C_{фл}$ достигает $\sim 2E$ - зарядного напряжения выпрямителя (удвоение имеет место при $C_{фл} \ll C$ и $R=0$, что и соблюдается в нашем случае).

Следует заметить, что модуляторе М-350 будет применена система стабилизации, аналогичная системе стабилизации модулятора М-250, но с более высокой (до 0,5%) степенью стабилизации за счет применения нового способа, разработанного в [6]. В настоящее время идет изготовление ее узлов и монтаж в модуляторе М-350.

3.3. Испытания ФЛ на базе конденсаторов К75-35 0,024x50 кВ

Эти испытания мы провели с целью определения работоспособности конденсаторов К75-35 в модуляторе М-350 на частоте 150 Гц. Они применяются в модуляторах ЛИУ-30, но с частотой посылок до 50 Гц. С этой целью были изготовлены две формирующие линии по 14 ячеек в каждой с использованием 28 конденсаторов этого типа. Исследовалась работа так называемой сдвоенной формирующей линии, когда разряд каждой цепочки из 14 ячеек (с волновым сопротивлением 8 Ом) осуществлялся по параллельным ветвям через два коммутатора - водородных тиратрона типа ТГИ1-2500/50 ("Идеал").

В результате на согласованной нагрузке был сформирован импульс тока длительностью 5 мкс с передним фронтом 100 нс при номинальном напряжении модулятора 47,5 кВ и при частоте следования импульсов 50 и 150 Гц. Импульсный ток в нагрузке достигал 6,3 кА. Испытания ФЛ проводились циклами по два часа. На частоте 50 Гц температура корпусов конденсаторов после двух часов не превышала 25-30 °С, а на частоте 150 Гц через 30 минут работы она достигала 60 °С.

Таким образом, конденсаторы типа К75-35 0,024 мкФ х 50 кВ удовлетворяют не всем требованиям, предъявляемым к оборудованию модулятора М-350. В частности, при частоте следования импульсов 150 Гц необходимы дополнительные меры по отводу тепла.

3.4. Исследование разрядной схемы модулятора М-350

Импульсная формирующая линия М-типа была предложена и исследована в [6]. Ее основными элементами являются индуктивно связанные регулируемые вариометры (так называемые элементы М-линии), состоящие из неподвижного ротора и вращающегося статора, каждый индуктивностью по 3 мкГн, так что образующаяся взаимная индуктивность между ними $M=1,5$ мкГн. Промышленное изготовление этих вариометров освоено в РИМРе [6], но стоимость изготовления их, как уже упоминалось в п. 3, достаточно высока.

На первом этапе стендовых исследований будут использованы макеты катушек индуктивности варианта формирующей линии L-типа. Ее параметры представлены на рис. 4, где индуктивности L1 - L14 - простые короткие соленоиды с числом витков 8, выполненные из медной трубки диаметром 10 мм (на каркасе из оргстекла диаметром 80 мм длиной 250 мм с подстроечными полыми (короткозамкнутыми с одной стороны) латунными сердечниками диаметром 30 мм длиной 80 мм, ввинчивающимися внутрь каркаса); Ls1 - Ls14 - собственные индуктивности конденсаторов формирующей линии, C1 - C14 - конденсаторы ИМК-100-0,05.

Процессы в схеме рис. 4 предварительно исследовались при помощи программы WPSpice. Ток, протекающий через нагрузку, представлен на рис. 5.

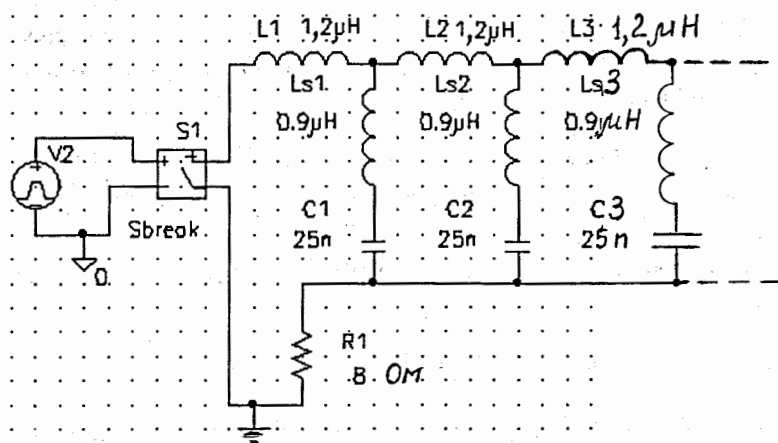


Рис. 4. Фрагмент импульсной формирующей линии модулятора М-350.

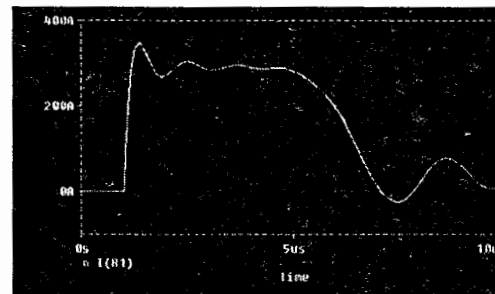


Рис. 5. Осциллограмма тока через нагрузку R1.

3.5. Эквивалент нагрузки модулятора

Прежде чем модулятор М-350 будет нагружен на клистрон 5045, все работы по наладке и формированию неискаженного выходного импульса модулятора должны быть проведены на эквивалент нагрузки. В противном случае искажения в форме импульса (неравномерность вершины импульса, колебания на его фронте и т.д.) скажутся на качестве пучка ускорителя ЛУЭ-200.

Основные требования к эквиваленту нагрузки модулятора:

1. Рабочее напряжение, кВ.....23,5
2. Амплитуда импульсного тока, кА.....6,3
3. Длительность импульса, мкс.....5,0
4. Рассеиваемая средняя мощность на частоте посылок 150 Гц, кВт.....150
5. Волновое сопротивление, Ом.....4
6. Отсутствие собственной индуктивности, широкополосность.

Конструкция эквивалента нагрузки, близкая к принятой в ИЯФ СО РАН, содержит 32 мощных высоковольтных резистора типа С5-40В- 32, которые соединяются в параллельно-последовательные ветви для получения сопротивления 4 Ом. Охлаждение каждого резистора осуществляется проточной дистиллированной водой, которая подается одновременно в корпус резистора, изготовленный из керамики, и в зазор между проволочным слоем резистора и наружным кожухом из винипласта или полиэтилена. Давление воды

в магистрали примерно 4 кгс/см^2 . Следует отметить, что завод-изготовитель выпускает этот тип резистора для применения в условиях естественного воздушного охлаждения. Использование воды для теплоотвода - это дальнейшее развитие перспективных, с нашей точки зрения, резисторов типа С5-40В для применения их в сильноточной импульсной технике.

4. Вакуумная система стенда

Необходимое разрежение остаточного газа в ускорителе в рабочем режиме составляет $1 \cdot 10^{-8}$ торр и обусловлено десорбцией газа со стенок вакуумных объемов. Повышенная скорость газоотделения со стенок волнового тракта, умножителя мощности и ускоряющей структуры вызвана действием СВЧ-поля высокой напряженности и оседанием части ускоряемых электронов на стенках электронного тракта.

Соответствующее качество поверхности ускоряющей секции, резонатора и волноводов гарантируется организациями-изготовителями и контролируется по мере их поступления заказчиком в процессе контрольной вакуумной откачки и масс-спектрометрии остаточного газа. Элементы вакуумной системы, изготавливаемые самостоятельно, например: вакуумные шибера, переходники, трубопроводы и т.д., подвергаются химической очистке, в зависимости от конфигурации их поверхности, а также очистке в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой, сушке и вакуумному отжигу.

В состав высоковакуумного откачивающего поста входит магниторазрядный насос типа НОРД-100 или НОРД-250, шибера ручного управления с металлическим уплотнителем, сильфонный переходник, высоковакуумный датчик типа ПММ-32 и вентиль ДУ-50 с металлическим уплотнением для присоединения к линии предварительной откачки. В состав поста предварительной откачки входят 4 цеолитовых насоса ЦВН-100, форвакуумный насос 2НВР-5Д с азотной ловушкой, турбонасос ВМН-500 с азотной ловушкой, один черновой насос НОРД-250, течейскапель ПТИ-10. Турбонасос отсекается от объема с помощью шибера с

электрическим управлением и с металлическим уплотнителем. Предусмотрена блокировка по вакууму при работе механического насоса и течейскаателя.

4.1. Структура вакуумного тракта и коммутирующая аппаратура

Исходя из увеличения надежности и для удобства эксплуатации весь вакуумный объем разделен на ряд автономных участков откачки. При аварийной ситуации или для проведения каких-либо работ, связанных с напуском, напуск газа производится только в один из таких участков, а не во всю установку. Все эти автономные участки отделяются друг от друга аварийными пневматическими шиберами с металлическим уплотнением и имеют дополнительный вентиль для подсоединения к общему коллектору предварительной откачки. Коллектором служит труба Ду = 70 мм. Помимо этого все высоковакуумные насосы чистой откачки также отделены от объема шиберами с металлическим уплотнением и с ручным управлением (Ду 80 по схеме). Высоковакуумные насосы также присоединяются к коллектору с помощью вентиля с металлическим уплотнением и ручным управлением. Условный проходной диаметр этих вентилях Ду-50. Диаметр соответствующих трубопроводов не менее 50 мм. Трубопроводы изготавливаются из немагнитной нержавеющей стали. Внутренняя поверхность их обезжиривается в органических растворителях и щелочах, с последующей промывкой в ультразвуковой ванне, сушкой и обезгаживающим отжигом при $t = 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Коллекторная труба очищается таким же образом при обязательном отжиге. Отжиг трубопроводов производится в период сборки или подетально в вакуумной печи.

4.2. Измерительная аппаратура и блокировочная система

Измерение давления осуществляется приборами типа ВТМ-2, имеющими 4 выхода для присоединения низковакуумных датчиков типа ПМТ-6-3 и 2 выхода для присоединения высоковакуумных датчиков типа ПММ-32-1. Высоковакуумные датчики располагаются вблизи магниторазрядных насосов, низковакуумные датчики имеются только в составе поста предварительной откачки.

Прибор имеет аналоговый выход 0 — 10 В, с помощью которого осуществляется перекрытие пневматических шиберов. Аналогичным образом при нарушении вакуума в период работы поста предварительной откачки происходит перекрытие форвакуумного насоса, теческателя и турбомолекулярного насоса. При этом происходит закрытие вентилей типа КВУМ-25 на форвакуумной линии и вентиля ЗПТ-100 с электрическим управлением над турбомолекулярным насосом.

В составе системы имеется один масс-спектрометр МХ-7304, служащий для контроля спектра остаточного газа, а также для поиска незначительных течей.

4.3. Состав вакуумного оборудования

- | | |
|---|----------|
| 1. Механический насос 2НВР-5ДМ | — 1 шт. |
| 2. Теческатель ПТИ-10 | — 1 шт. |
| 3. Турбомолекулярный насос ВМН-500 | — 1 шт. |
| 4. Сорбционный цеолитовый насос ЦВН | — 4 шт. |
| 5. Магниторазрядный насос НОРД-250 | — 1 шт. |
| 6. Магниторазрядный насос НОРД-100 | — 4 шт. |
| 7. Магниторазрядный насос триодного типа | — 1 шт. |
| 8. Пневматических шиберов типа VAT | — 2 шт. |
| 9. Ручных шиберов ДУ-80 с металлическим уплотнением | — 4 шт. |
| 10. Вентилей ДУ-50 с металлическим уплотнением | — 10 шт. |
| 11. Затвор ЗПТ-100 с электрическим управлением | — 1 шт. |
| 12. Вентиль напуска ДУ-10 с металлическим уплотнением | — 7 шт. |
| 13. Вентили типа КВУМ-25 | — 2 шт. |
| 14. Вентили с металлическим уплотнением ДУ-25 | — 4 шт. |
| 15. Датчик типа ПММ-32-1 | — 6 шт. |
| 16. Датчик типа ПМГ-6-3 | — 3 шт. |
| 17. Прибор для измерения вакуума ВТМ-2 | — 2 шт. |

18. Масс-спектрометр МХ-7304

— 1 шт.

При использовании двух насосов типа ЦВН-1-2 для откачки одной ступени (ускорительной секции) можно получить давление на уровне $P_1 = 10^{-2}$ торр.

5. Структурная схема и основные элементы ВЧ-тракта системы питания ускоряющей секции стенда

Основными элементами высокочастотного тракта являются ускоряющая секция; группирователь; усилитель мощности; устройство повышения СВЧ-мощности; направленный ответвитель; регулируемый фазовращатель; аттенюатор; вакуумные посты; вакуумное окно; поглощающая нагрузка большой мощности. Питание ускоряющей секции осуществляется от клистронного усилителя с выходной мощностью 67 МВт в импульсе длительностью 3,5 мкс. Для повышения импульсной мощности ускоряющей СВЧ-волны в тракте питания ускоряющей секции устанавливается система компрессии энергии СВЧ-поля с накопительным резонатором (система типа SLED). Каждая система содержит два высокочастотных накопительных резонатора, подключенных к тракту с помощью волноводного моста, и позволяет повышать импульсную мощность СВЧ-волны в 5-6 раз при сокращении длительности выходного импульса. В данном случае пиковая мощность повышается до 360 МВт, а длительность импульса сокращается до 0,8 мкс.

Т.к. основной волноводный тракт, передающий мощность от клистрона к ускоряющей секции, работает с достаточно высокими мощностями, то необходима его вакуумная откачка. Тракт изготавливается из стандартных медных прямоугольных волноводов с внутренним сечением 72x34 мм и толщиной стенки 5 мм. Для соединения отдельных элементов волноводного тракта используются контактные прямоугольные фланцы с вакуумным уплотнением. Система компрессии энергии располагается возможно ближе к входу ускоряющей секции, чтобы обеспечить минимальную длину и количество элементов, работающих на максимальных уровнях мощности. К ускоряющей секции Стенда

система компрессии подключается через волноводный элемент с СВЧ-зондом.

Необходимая для группирователя часть мощности, максимальная величина которой не превышает 1 МВт, снимается с СВЧ-тракта ускоряющей секции с помощью направленного щелевого ответвителя с переходным ослаблением 18 дБ. Поскольку уровень мощности в СВЧ-тракте группирователя относительно небольшой, то он не требует вакуумной откачки или какого-нибудь газового наполнения (например, азотом или элегазом). Это позволяет использовать более тонкие, а следовательно и более легкие, волноводы (с толщиной стенки 2 мм) и существенно упростить конструкцию фланцевых соединений и отдельных элементов этого тракта. В частности, здесь для соединения волноводов предполагается использование более дешевых (технологичных) круглых дроссельных фланцев. Необходимые параметры ВЧ-поля в группирователе при настройке и эксплуатации ускорителя устанавливаются с помощью регулируемых фазовращателя и аттенюатора. Фазовращатель тромбонного типа выполнен на основе волноводного моста и обеспечивает изменение фазы проходящей ВЧ-волны в пределах от 0 до 360. Регулируемый аттенюатор представляет собой делитель мощности с изменяемым коэффициентом деления. В зависимости от состояния регулирующего элемента (фазовращателя) мощность, снимаемая ответвителем с ВЧ-тракта, распределяется между группирователем и поглощающей нагрузкой в необходимом соотношении.

Часть волноводного тракта, находящаяся под атмосферным давлением (тракт низкого уровня мощности), отделяется от вакуумной части керамическими окнами баночного типа. Вакуумная откачка тракта осуществляется с помощью вакуумных постов, из которых два располагаются на ускоряющей секции, один - на группирователе, один - в системе компрессии и один - в волноводном тракте сразу после выхода клистронного усилителя.

Непосредственно перед входом ускоряющей секции располагается ВЧ-зонд. Он предназначен для наблюдения огибающей и измерения

основных параметров ВЧ-импульса на выходе системы компрессии энергии. Используемый зонд не обладает направленностью, поэтому достоверная информация о параметрах ВЧ-импульса, поступающего на вход ускоряющей секции, может быть получена только при незначительной амплитуде отраженной волны. Предполагается, что ускоряющая секция и оконечная поглощающая нагрузка достаточно хорошо согласованы. Специальный зонд, позволяющий отдельно определять характеристики как прямой, так и обратной волн, устанавливается на выходе клистронного усилителя.

6. Заключение

В процессе создания полномасштабного ускорителя установки ИРЕН ЛНФ ОИЯИ смонтирована и налажена система высоковольтного питания [7], система импульсного питания клистрона 5045 (первый вариант модулятора М-350), системы водоохлаждения, УБС и контроля [8]. Электросиловое оборудование стенда прошло испытания в номинальном режиме модулятора М-350.

Проведены испытания различных типов конденсаторов для формирующих линий модулятора, нескольких эквивалентов нагрузки и выбраны оптимальные с точки зрения эксплуатации элементы модулятора.

В КБ ЛНФ подготовлены проекты вакуумной и СВЧ-систем стенда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Status IREN Project, Proc. of the Conf. on Particle Acc. and High Energy., Texas, Dallas, 1995.
2. KEK, Japan, JLC Study Group, ATF S-band Linac Regular Accelerator Unit, September 23, 1994.
3. SLAC-PAB-3993, June 1986 (A). A.R. Donaldson, J.C. Cron, and R.R. Hanselman. The second generation SLAC modulator. SLAC, Stanford University, Stanford, California 94305.
4. Труды восьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 1983 г., том II, с. 410.

5. Диканский, А.В. Новохатский, С.Б. Вассерман и др. "Линейный ускоритель электронов для интенсивного источника резонансных нейтронов (ИРЕН)", Отчет о научно-исследовательской работе, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1993 г.
6. Куперман, А.М. Долгов, Е.А. Петров и др. "Определение основных технических решений и состава оборудования модулятора клистрона 5045 (SLAC) для испытательного стенда ускорителя ЛУЭ -200", Отчет о научно-исследовательской работе, РИМР, г. С.-Петербург, 1995 г.
7. И.Н. Мартынов, Ю.А. Метелкин, В.А. Швец. Стенд модулятора клистрона 5045 (SLAC), 1994 г., годовой отчет ЛНФ.
8. И.Н. Мартынов, Ю.А. Метелкин, В.А. Швец. Стенд модулятора клистрона 5045 (SLAC), 1995 г., годовой отчет ЛНФ.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 декабря 1996 года.