

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Н.А. Винокуров, В.В. Котенков, Г.Я. Куркин,
Л.Э. Медведев, Л.А. Мироненко, А.Д. Орешков,
Т.В. Саликова, М.А. Щеглов

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЛСЭ

ИЯФ 2006-27

Новосибирск
2006

Вакуумная система ЛСЭ

*Н.А. Винокуров, В.В. Котенков, Г.Я. Куркин,
Л.Э. Медведев, Л.А. Мироненко, А.Д. Орешков,
Т.В. Саликова, М.А. Щеглов*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, СО РАН

Аннотация

В этой статье описана вакуумная система мощного терагерцового лазера на свободных электронах, построенного в Сибирском центре фотохимических исследований. Вакуумная система ЛСЭ содержит новые технологические решения: «дежурные блоки» – источники питания магниторазрядных насосов; аппаратные и программные средства, предназначенные для мониторинга вакуума и обеспечивающие защиту некоторых технологических узлов ЛСЭ в случае понижения вакуума.

Vacuum system of FEL

*N.A. Vinokurov, V.V. Kotenkov, G.Ya. Kurkin,
L.E. Medvedev, L.A. Mironenko., A.D. Oreshkov,
T.V. Salikova, M.A. Scheglov*

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, SB RAS

Abstract

In this article is described the vacuum system of the powerful terahertz free electron laser constructed in the Siberian Center for Photochemical Research. Vacuum system of FEL contains the new technological decisions: “standby blocks” – power supply of pumps; hardware and software intended for the vacuum’s monitoring and ensuring the protection of some technological units of FEL in case of vacuum’s downturn.

© *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

Вакуумная система первой очереди ЛСЭ [1] представляет собой секционированный замкнутый канал объемом около 20 м³, который обслуживают 34 магнитоэлектрических насоса, поддерживающие вакуум в системе на уровне $\sim 10^{-5}$ Па. На рисунке 1 представлено месторасположение насосов (нумерация по ходу пучка) и основных шиберов, позволяющих при возникновении аварийной ситуации перекрыть поврежденную вакуумную секцию.

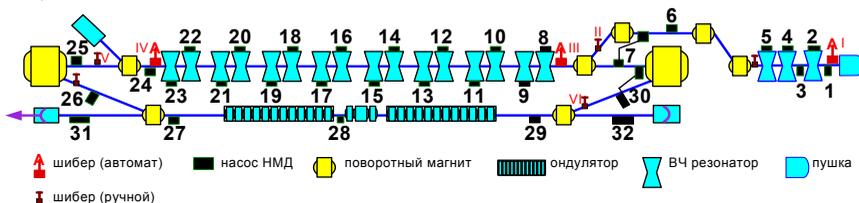


Рис. 1. Вакуумная система первой очереди ЛСЭ.

Места с повышенным газовыделением оборудованы отдельными насосами. В наиболее тяжелых условиях вакуумной откачки находятся следующие элементы ЛСЭ:

1. Электронная пушка. Источником электронов в пушке является термокатод, долговечность и эмиссионная способность которого зависят от вакуумных условий. В ускорительной трубке, где напряжение поднимается до 300 кВ, возможны микропробои и поверхностный разряд по керамическим поверхностям, что приводит к порче вакуума.
2. Резонаторы ВЧ системы. Рабочее напряжение на зазоре ВЧ резонатора устанавливается равным 700 кВ, что может приводить к возникновению мультиспектрального (вторично-эмиссионного резонансного разряда), как при подъеме напряжения, так и при снятии.
3. Вакуумные камеры поворотных магнитов являются местом частичного попадания 12 МэВ пучка на стенки камеры, а в поглотителе рекуперированный 2 МэВ пучок полностью поглощается, что приводит к десорбции газа с поверхности и к ухудшению вакуума.

Технологические особенности вакуумной системы ЛСЭ

Для удобства эксплуатации вакуумный канал разделен 21 высоковакуумными шиберами на отдельные сегменты, что позволяет отсекал нужный сегмент вакуумной камеры без нарушения рабочего вакуума в остальной системе и проводить независимо откачку каждого сегмента вакуумной камеры. Так перед подключением к вакуумной системе каждый технологический узел подвергался тщательному прогреву с одновременной высоковакуумной откачкой при температуре $250 \div 300$ °С.

ВЧ резонаторы в откачанном состоянии транспортировались к месту сборки и только после установки в систему открывались соединительные шибера. Цикл прогрева блока из двух резонаторов занимал около трех суток. После механической сборки проводился прогрев под откачкой стыковочных узлов между резонаторами и прямолинейных участков канала. Следующий этап – это тренировка каждого из резонаторов до достижения необходимой амплитуды ВЧ поля.



Рис. 2. «Дежурные блоки» питания магнитоэридных насосов и датчики тока насосов.

Расположение магнитоэридных насосов [2] первой очереди ЛСЭ представлено на рисунке 1, это 4 насоса типа НМД-0.41, размещенные около зеркал оптического резонатора и вблизи ондулятора, 30 насосов марки ПВИГ-100/160/9-018, распределенные между резонаторами и остальными узлами микротрона. Все насосы разбиты на группы по 5 штук, каждая группа через коммутационную диодную развязку (Рис. 4) питается от отдельного источника - «дежурного блока» (Рис. 2), его параметры приведены в табл. 1.

Изначально высоковольтный источник питания магнитоэридных насосов «дежурный блок» разрабатывался для круглосуточной, непрерывной откачки вакуумной системы ЛСЭ. При отсутствии электронного пучка, например, в ночное время, выходные и праздничные дни питание насосов

осуществляется посредством «дежурных блоков». В связи с тем, что эксплуатация «дежурных блоков» протекает без присмотра оперативного персонала, особое внимание при разработке было обращено на пожарную безопасность и надежность блоков. Незначительная потребляемая мощность и отсутствие легковоспламеняющихся материалов в конструкции «дежурных блоков» сводят вероятность самовозгорания практически к нулю. В режиме короткого замыкания по высокому напряжению блок работает в режиме ограничения тока (до 3 мА), потребляемая мощность от сети не более 20 Вт. В сетевой цепи установлены два плавких предохранителя на 0.25 А для дополнительной защиты.

Таблица 1. Основные параметры «дежурного блока» питания насосов

Регулируемое выходное напряжение	$3 \div 7 \text{ кВ}$
Ток нагрузки	$\leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ А}$
Частота внутреннего генератора	30 кГц
Мощность, потребляемая от сети	20 Вт

Выходное напряжение на «дежурных блоках» задается ниже на 200÷400 В, чем на основных источниках питания насосов БП-138, поэтому в рабочем режиме ток, потребляемый от «дежурного блока» равен нулю. При выключении основных источников питания БП-138 ток всех вакуумных насосов «перехватывается» дежурными блоками.

Снижение напряжения на 200 В на уровне 6 кВ практически никак не сказывается на производительности насосов. Полный ток всех насосов в дежурном режиме не превышает 2 мА, что не превышает мощности «дежурных блоков».

Непрерывная, безаварийная эксплуатация «дежурных блоков» в течение нескольких лет показала их надежность и позволила изменить схему питания насосов в дежурном режиме, практически исключить из обращения пожароопасные и ненадежные блоки питания БП-138.

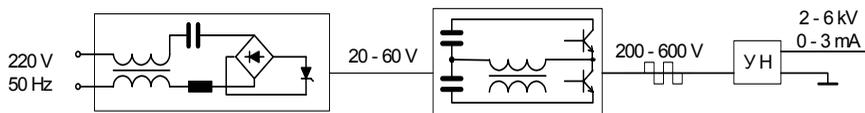


Рис. 3. Принципиальная схема «дежурного блока» питания магнито-разрядных насосов, (УН – умножитель напряжения).

Питание всех вакуумных насосов первой очереди ЛСЭ производится от двух стоек типа «Вишня» (Рис. 2), каждая из которых содержит блок ввода питания с коммутационной аппаратурой и защитными автоматами, блоки питания БП-138 «рабочие блоки» и несколько маломощных высоковольтных

«дежурных блоков», работающих непрерывно. На блоках питания БП-138 установлено выходное напряжение несколько выше напряжения маломощных «дежурных блоков», он подключается к сети только на время работы ускорителя, и через коммутационную диодную развязку (Рис. 5) может «поддерживать» любую из семи групп насосов, потребляющих от маломощного «дежурного блока» ток не более 2 мА, принципиальная схема коммутационной диодной развязки приведена на рисунке 4.

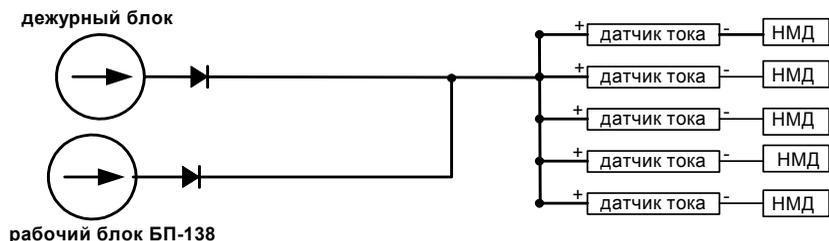


Рис. 4. Принципиальная схема коммутационной диодной развязки питания магниторазрядных насосов.



Рис. 5. Коммутационная диодная развязка питания магниторазрядных насосов.

Система вакуумного контроля

Во время работы микротрона система вакуумного контроля осуществляет не только мониторинг вакуума вдоль всего канала, но также и обеспечивает защиту. Так в случае ухудшения вакуума, когда ток магнитоэридного насоса достигает заданного контрольного уровня, система защиты (аппаратная и программная) отключает питание модулятора и накал в пушке, срабатывают системы защиты некоторых технологических узлов микротрона и инжектора. А в случае обнаружения течи производится отсечение поврежденного участка с помощью шиберов, оборудованных блоком дистанционного управления (Рис. 1).

Так как величина тока насоса связана с давлением остаточных газов в откачиваемом объёме, ток насоса используются для определения вакуума посредством датчика тока насоса. Каждый магнитоэридный насос снабжен отдельным датчиком тока (Рис. 2). Сигнал с датчика тока поступает на двухканальный «блок вакуума», представленный на рисунке 6. Датчик тока насоса включается в высоковольтную цепь между источником питания и вакуумным насосом и является преобразователем ток-частота, т.е. частота выходных импульсов датчика пропорциональна току насоса, технические параметры датчика тока приведены в таблице 2. Датчик тока насоса имеет 2 высоковольтных разъёма, один из которых подключается к насосу, а второй к высоковольтному источнику питания насоса. На датчике разъёмы маркированы знаками «+» и «-». Насос должен быть подключен к разъёму со знаком «-», а источник питания к разъёму со знаком «+».

Таблица 2. Основные характеристики датчика тока насоса

Линейный диапазон с точностью 5%	0,5 мкА – 20 мА
Коэффициент преобразования	5 кГц/мА
Максимальная частота выходных импульсов	< 120 кГц
Ток утечки датчика	< 20 нА
Максимальный допустимый длительный ток	< 1А
Испытательное напряжение для высоковольтной части датчика	10 кВ

Точность измерения со стороны высокого вакуума ограничивается собственными утечками датчика и утечкой тока вакуумного насоса. Максимальное измеряемое давление ограничивается величиной линейного диапазона датчика. Импульсы с выхода датчика поступают на вход «блока вакуума». На передней панели «блока вакуума» имеется цифровой индикатор, показывающий величину тока насоса в амперах. Кроме того, «блока вакуума» имеет аналоговый выход для контроля вакуума с помощью АЦП. $I [A]$ – значение тока насоса экспоненциально зависит от напряжения,

прочитанного с блок вакуума – $V_{АЦП}$ [В].

$$I = e^{K_1 V_{АЦП} + K_2}$$

Коэффициенты K_1 и K_2 для каждого канала блока вакуума индивидуальные (приблизительно равны $K_1 = 3.684$; $K_2 = -18.42$). Значение вакуума P [Торр] пропорционально току магниторазрядного насоса I [А], где $C = 1000$ [А/Торр] (или P [Торр] = $132.3 P$ [Па], $C = 1000/132.3$ [А/Па]), равно:

$$P = \frac{I}{C} = 10^{-3} e^{K_1 V_{АЦП} + K_2}$$

Данная аппаратура была разработана для контроля вакуума внутри резонаторов ВЧ системы, а также для выявления вторично-эмиссионного резонансного разряда (мультипактора). При возникновении мультипактора происходит резкое ухудшение вакуума, сопровождаемое пропорциональным ростом тока магниторазрядного насоса. При достижении устанавливаемого переключателями на передней панели блока вакуума заданного порогового уровня тока, происходит выключение ВЧ генератора за время менее 1 мсек. При этом снимается высокочастотный сигнал возбуждения входного каскада ВЧ генератора.

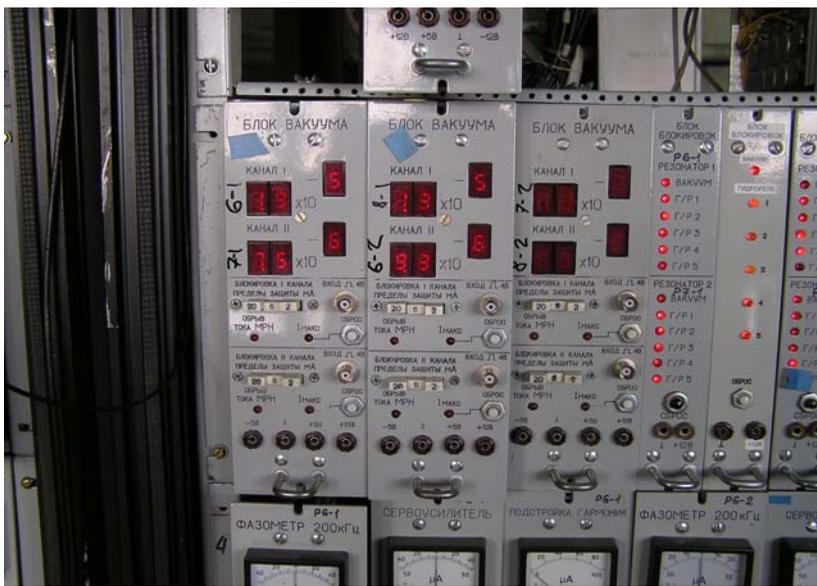


Рис. 6. Блоки вакуума.

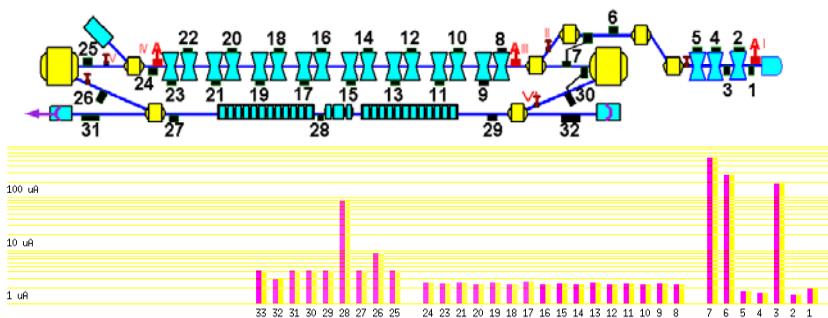


Рис. 7. Схема расположения вакуумных датчиков и уровень вакуума в системе.

Уровень вакуума является одной из диагностических характеристик работы любого технологического узла сложного комплекса ЛСЭ, а также для управления комплексом оператору необходимо иметь общее представление о текущем состоянии вакуумной системы. Поскольку система управления ЛСЭ создана на базе EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System – комплекса программных средств, предназначенных для создания распределенных систем управления), прозрачность распределенной системы (прозрачность – одно из важных свойств системы, реализованной на базе EPICS [3]) позволяет свободно выбирать текущие значения вакуума в различных точках установки. Программа “Vacuum” осуществляет визуализацию вакуумных объектов, на рисунке 7 представлена схема расположения вакуумных датчиков, а под ней «вакуумный профиль» – гистограмма значений вакуума в логарифмическом масштабе по пути следования пучка от пушки к поглотителю. Для индикации «порчи вакуума» используется цветовая сигнализация. Если производная по вакууму начинает расти, соответствующий «столбик» на гистограмме окрашивается в желтый цвет, если уровень вакуума превышает 200 мкА – цвет «столбика» красный. Программа “Vacuum” ведет бортовой журнал, где записывается максимальные и средние значения всех вакуумных датчиков в течение заданного периода (по умолчанию период равен 10 мин). Если же значение вакуумного датчика превышает критический уровень, заданный для данной точки вакуумной камеры, то в бортовом журнале фиксируется каждое измерение (выборка данных производится с частотой 1 Гц). Что позволяет в хронологическом порядке проследить состояние вакуумной системы и определить влияние других параметров ЛСЭ на вакуум.

С помощью системы вакуумного контроля можно следить за прохождением электронного пучка, поскольку даже незначительное высыпание электронов на стенки вакуумного канала приводит к ухудшению вакуума. В штатном режиме на гистограмме отражаются текущие значения

вакуума (первый режим визуализации). Второй режим визуализации, это когда выводятся разности текущего и предыдущего значений вакуума (или производная $I_{(t)} - I_{(t-1\text{sec})}$). Третий режим позволяет следить за эволюцией вакуума в системе, в определенный момент времени все показания вакуумных датчиков принимаются за «контрольные точки», и далее выводятся разности между текущими значениями вакуума и «контрольными точками». Например, за «контрольные точки» выбирается момент, когда в микротроне нет пучка, и далее по «вакуумному профилю» можно проследить места, где происходит частичные потери пучка. Аналогично можно проследить и места течи вакуумной камеры.

Вторая очередь ЛСЭ

Вторая очередь ЛСЭ будет монтироваться без нарушения работоспособности установки, дополнительно будут смонтированы 4 дорожки, что позволит работать с 50 МэВ пучком (Рис. 8). На второй дорожке будет организован «байпас», что позволит работать и с 25 МэВ пучком.

Проектирование второй очереди ЛСЭ велось на основе тех же принципов, что и первой очереди:

1. Секционированная откачка из расчета примерно 1 насос на 3 метра длины канала.
2. Секционированное питание насосов. Из расчета на 5 насосов один «дежурный блок» питания.
3. Установка высоковакуумных шиберов на случай возникновения нештатных ситуаций.
4. единая система оперативного контроля вакуума для всех насосов, и протоколирование состояния вакуумной системы.

В вакуумную систему дополнительно будут включены 11 магнито-разрядных насосов: два насоса класса НМД 0.41 для оптического резонатора ЛСЭ 2-й дорожки, и два НМД 0.16 для оптического резонатора ЛСЭ 4-й дорожки, расположение остальных насосов указано на рисунке 8.

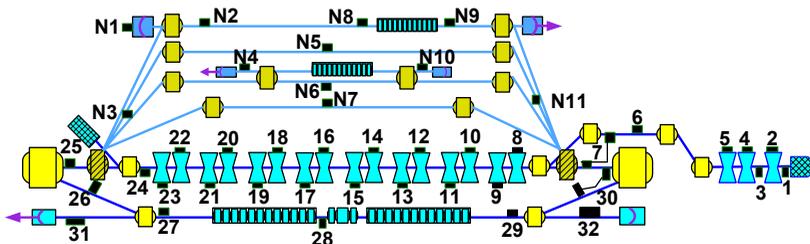


Рис. 8. Вакуумная система второй очереди ЛСЭ.

Литература

- [1] *Bolotin V.P., Vinokurov N.A., Kayran D.A., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Oreshkov A.D., Ovchar V.K., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Skrinsky A.N., Shevchenko O.A., Scheglov M.A.* Status of the Novosibirsk terahertz FEL, Nuclear instruments and methods in physics research, Sec. A. 2005. v.A543, No.1, p.81-84.
- [2] Насос магниторазрядный диодный охлаждаемый НМДО-01-1 (НОРД-250). Техническая документация. 1976.
- [3] *M. Kraimer, J. Anderson, A. Johnson, E. Norum, J. Hill, R. Lange, B. Franksen.* EPICS Input/Output Controller Application Developer's, Guide. Release 3.14.8, 2005. Argonne National Laboratory, <http://www.aps.anl.gov/epics>

*Н.А. Винокуров, В.В. Котенков, Г.Я. Куркин,
Л.Э. Медведев, Л.А. Мироненко, А.Д. Орешков,
Т.В. Саликова, М.А. Щеглов*

Вакуумная система ЛСЭ

*N.A. Vinokurov, V.V. Kotenkov, G.Ya. Kurkin,
L.E. Medvedev, L.A. Mironenko., A.D. Oreshkov,
T.V. Salikova, M.A. Scheglov*

Vacuum system of FEL

ИЯФ 2006-27

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 15.05. 2006 г.

Сдано в набор 16.05. 2006 г.
Подписано в печать 17.05.2006 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 0.7 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 27

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапринте “ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН”,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11