

К ВОПРОСУ МОДЕРНИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУЭ-75 ННЛА (ЕрФИ)

Л.Р. ВАГРАДЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

e-mail: l.vahradyan@yerphi.am

(Поступила в редакцию 27 июня 2023 г.)

Кратко изложено научно-техническое состояние линейного ускорительного комплекса Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна ЛУЭ-75 после проведенных в последние годы реновационных работ. Обосновывается необходимость дальнейшей модернизации основных систем ускорителя для обеспечения его долгой научной жизни. Проведен анализ состояния отдельных систем ускорителя и приведены расчетные данные, на основании которых предлагается модернизация внедрением современной техники. Предлагается использование силовой электроники нового поколения, вакуумного оборудования с современным интерфейсом, системы термостабилизации.

1. Введение

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна (ННЛА, Ереванский физический институт (ЕрФИ)) служил инжектором синхротрона АРУС. После остановки синхротрона он работает в автономном режиме и обеспечивает электронными пучками и вторичными излучениями для проведения экспериментов в области ядерной физики низких энергий.

Линейный ускоритель работает в диапазоне энергий электронов до 75 МэВ со средними токами пучка до 10 мкА. Ускоритель должен перманентно развиваться, чтобы удовлетворять растущим требованиям к параметрам пучка. Без внедрения новой техники ускоритель не может иметь долгую научную жизнь. Для улучшения качества проводимых исследований и повышения востребованности планируется модернизация линейной ускорительной установки с внедрением современной техники. Основное внимание уделяется жизненно важным системам: вакуумной технике, системам термостабилизации и охлаждения, модуляторам мощных усилительных клистронов. Современная измерительная аппаратура позволит повысить точность и качество проводимых экспериментов.

В настоящей работе после краткого обзора научно-технического состояния линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 излагаются вопросы модернизации этой уникальной в Армении установки.

2. О линейном ускорителе ЛУЭ-75

Ускорительный комплекс состоит из линейного ускорителя электронов и тракта параллельной транспортировки пучка. Ускорительная структура содержит банчер (волноводный группирователь) и три идентичные ускоряющие секции, представляющие собой круглые диафрагмированные волноводы, работающие в

S-диапазоне на бегущей волне. Источником электронов служит термоэлектрический катод, помещенный в диодную пушку с оптикой Пирса. Энергия инжекции электронов в банчер 50 кэВ. В нем электроны группируются в сгустки и одновременно ускоряются до энергии 3 МэВ. Питание секций осуществляется от трех клистронных постов, построенных на базе мощных пролетных клистронов типа КИУ-12АМ. Первый клистрон работает в режиме самовозбуждения, снабжая остальные клистроны входной мощностью [1]. Часть мощности 1-го клистрона с помощью регулируемого направленного ответвителя поступает на вход волноводного группирователя. Питание ЛУЭ-75 осуществляется от 0.1%-ой стабильной трехфазной электрической сети.

ЛУЭ-75 обеспечивает ускорение электронов в диапазоне энергий 10–75 МэВ при токах в импульсе до 150–200 мА, что соответствует среднему току до 10 мкА (без коллимации) в зависимости от длительности макроимпульса и энергии; на номинальных энергиях ширина энергетического спектра (FWHM) порядка 2%. Отработанные режимы позволяют получать интенсивности от десятков до 5×10^{13} электронов в секунду.

На линейном ускорителе в последние годы были проведены некоторые работы, улучшающие его параметры. Отметим основные из них: бариево-никелевый катод был заменен металлокерамическим с относительно большим временем наработки, с большей эмиссией и менее подверженным окислению; с целью снижения уровня радиационного фона при выключенном синхротроне и влияния электрических наводок и радиопомех от работающих систем линейного ускорителя на измерительную аппаратуру в зале синхротрона был построен тракт транспортировки электронного пучка с параллельным переносом вдали от ЛУЭ; энергия пучка была доведена с 50 МэВ до проектного значения 75 МэВ [2]. Эти и другие работы расширили возможности ускорителя и, соответственно, спектр научных исследований, планируемых экспериментаторами.

Была разработана и в дальнейшем усовершенствована методика получения уникальных электронных пучков экстремально низкой интенсивности [3]. Совместно с научной группой из Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна, РФ) разработана и применена методика энергетического тестирования детекторов элементарных частиц пучками с экстремально низкой интенсивностью в несколько десятков электронов в секунду. Эта методика была использована при исследовании прототипа электромагнитного калориметра для планируемого в Фермилаб (FNAL, USA) эксперимента Mu2e. Низкоинтенсивные пучки могут быть также использованы для изучения отдельных событий, дифракционных задач, исследования излучения электронов в монокристаллах, изучения биологических эффектов ионизирующей радиации в малых дозах, исследования радиационной стойкости полупроводниковых материалов, в нанотехнологиях. Подробно параметры линейного ускорительного комплекса, включая тракт параллельного переноса, представлены в работах [2, 3].

3. Вопросы модернизации ЛУЭ-75

3.1. Модуляторы клистронов: силовая электроника

Модуляторы дают импульсы с амплитудой до 300 кВ и длительностью 2.2 мкс для питания мощных клистронов типа КИУ-12АМ. От формы

модулирующего импульса во многом зависит качество электронного пучка, в частности, ширина энергетического спектра (рис.1). В модуляторах использованы водородные импульсные тиратроны типа ТГИ1-2500/35, которые вышли из производства.

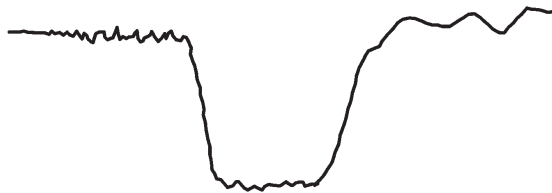


Рис.1. Типовая осциллограмма выходного импульса модулятора клистрона.

Возникла задача замены тиратронных коммутаторов на современные. При подборе типа коммутатора мы исходили из примерного соответствия технических характеристик, минимальных конструктивных и схемных изменений в модуляторах при замене, времени наработки, экономических соображений. Наиболее близкими по электрическим параметрам оказались тиратроны типа CX1525A фирмы «e2v Technologies» и тиратроны нового поколения ТГИ-типа предприятия ООО «Импульсные технологии» [4]. Установка тиратронов ТГИ-типа потребует минимальных изменений в схемах питания и охлаждения, их приобретение экономически более выгодно. Фирма предоставляет также переходники при замене ТГИ1-2500/35 на тиратроны нового поколения. При использовании новых тиратронов типа ТГИ1-5к/50 можно ограничиться двумя последовательно соединенными тиратронами в каждом модуляторе вместо трёх, используемых в настоящее время.

Металлокерамическое исполнение этих приборов более безопасно в использовании по сравнению с эксплуатируемыми ныне стеклянными тиратронами типа ТГИ1-2500/35: внутренний экран минимизирует уровень рентгеновского излучения из анодной области. В табл.1 приведены некоторые основные сравнительные характеристики тиратронов.

Табл.1. Параметры используемого тиратрона и тиратронов нового поколения

Наименование параметра	ТГИ1-2500/35	ТГИ1-5к/50	ТГИ2-3к/30
Напряжение накала, В	6.3	5.0/6.5	4.0/6.5
Ток накала, А	50–60	20–30	не более 25
Импульсный анодный ток, А	2500	2500	2500
Длительность импульса анодного тока, мкс	10	0.02–50	10
Частота импульсов анодного тока, Гц	250	200	300
Прямое и обратное напряжения, кВ	не более 35	не более 50/20	не более 30
Ресурс, час	500	не менее 3000	2000
Масса, кг	7	3.2	4

Ожидается, что использование тиратронов нового поколения приведет к улучшению импульса: уменьшению длительности фронта, к увеличению плоской части импульса – рабочего участка, а значит, к улучшению стабильности пучка в течение импульса.

Отметим, что при применяемых на ускорителе больших напряжениях и токах замена газонаполненных тиратронов твердотельными коммутаторами на основе IGBT транзисторов потребует серьезных конструктивных и схемотехнических изменений и более затратна из-за усложнения схемы. Имеются неясности касательно срока службы IGBT-модулей. На данном этапе их использование в качестве коммутаторов непрактично.

Имеющиеся в наличии в ННЛА мощные усилительные клистроны обеспечат функционирование линейного ускорителя на ближайшие годы. Однако при переходе в дальнейшем на клистроны нового поколения и замене модуляторов на более компактные модули, потребление электроэнергии удастся значительно снизить.

3.2. Система термостатирования и охлаждения

Для устойчивого ускорения электронного пучка и стабильности его энергии и интенсивности требуется высокая стабильность собственной частоты ускоряющих секций, а также частоты и мощности генераторов СВЧ-колебаний с целью поддержания фазовых соотношений ускоряющих полей в диафрагмированных волноводах. Для обеспечения неизменности геометрии резонансных структур необходимо обеспечить температурную стабилизацию как ускоряющих секций, так и клистронных генераторов.

На ЛУЭ-75 действуют два независимых контура термостатирования и охлаждения, построенные до 90-ых годов. Один из контуров служит для термостабилизации ускоряющих секций, другой – для клистронов с фокусирующими катушками и других узлов, требующих охлаждения.

Поддержание требуемой температуры в пределах $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ от выставленной осуществляется с помощью регулируемого нагрева подаваемой воды на входе каждой секции. Сигналы с платиновых датчиков, установленных на выходах секций, подаются на схемы управления (ШИМ-модуляция, тиристорные блоки), расположенные в пультной комнате линейного ускорителя. С использованием программы LabView и модулей САМАС ведется мониторинг температур термостатирующей воды ускоряющих секций и воды на входах и выходах клистронов. Система охлаждения мощных пролетных клистронов не содержит нагревательных блоков. Действующая система термостабилизации построена на элементах, снятых с производства, полупроводниковая электроника стареет, ухудшаются параметры. Требуется создание новой системы с использованием современной элементной базы, компактных высокоэффективных теплообменников.

Когда линейный ускоритель работал в качестве инжектора синхротрона, требовалось одно и то же значение энергии и тока. В настоящее время ускоритель работает в автономном режиме и выдает экспериментаторам пучки различной энергии и интенсивности в пределах, приведенных выше. При необходимости оперативной перестройки выходных параметров меняются СВЧ-мощности, поступающие в секции. Система термостабилизации обладает большой

инерционностью и физически устарела. Поэтому планируется разработать новую систему термостатирования секций и охлаждения узлов ускорителя с применением ПИД-регулирования и модульной схемы, при которой термостабилизация каждой секции осуществляется своей автономной системой, что обеспечит автоматическое поддержание температуры секций в заданных пределах при длительных сеансах, а также оперативность и точность установления температур секций при изменении режимов линейного ускорителя.

Согласно паспортным техническим данным суммарный фазовый сдвиг на ускоряющую секцию равен 5.76 градусов. Этот сдвиг вызван систематической погрешностью в размерах ячеек секций. При изменении температуры размеры ускоряющего волновода меняются и возникает дополнительный фазовый сдвиг электронов относительно волны. В основных секциях сгустки при настройке помещаются на вершине волны, чтобы получить наибольшее ускорение. Если не стабилизировать температуру секций, то с течением времени это приведет к недобору энергии и увеличению энергетического разброса пучка электронов.

Величина уменьшения энергии при небольших изменениях фазы равна

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{(\Delta\varphi)^2}{6}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – сдвиг фазы. Согласно справочнику по диафрагмированным волноводам [5],

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi}{c\beta_{ph}} \left(1 - \frac{f}{\beta_{ph}} \frac{d\beta_{ph}}{df} \right) L\alpha_T f\Delta T, \quad (2)$$

где β_{ph} – относительная фазовая скорость волны; $f = 2.7972 \times 10^9$ Гц; $L = 4.15$ м – активная длина диафрагмированного волновода; при расчете изменения энергии пучка на выходе линейного ускорителя следует брать суммарную длину всех трех секций, $L = 3 \times 4.15$ м; α_T – температурный коэффициент линейного расширения материала волновода, для меди при 30°C (рабочая температура секции) $\alpha_T = 1.68 \times 10^{-5}$ К⁻¹; Коэффициент дисперсности диафрагмированного волновода $f d\beta_{ph}/df$ найдем из выражения для групповой скорости β_{gr} [5]:

$$\beta_{gr} = \frac{\beta_{ph}^2}{\beta_{ph} - f \frac{d\beta_{ph}}{df}},$$

откуда

$$f \frac{d\beta_{ph}}{df} = \beta_{ph} \left(1 - \frac{\beta_{ph}}{\beta_{gr}} \right), \quad (3)$$

Подставляя в (3) данные для рассматриваемых секций $\beta_{ph} = 1$ и $\beta_{gr} = 0.033$, найдем коэффициент дисперсности $f d\beta_{ph}/df = -29.3$. Пользуясь выражениями (1) и (2), легко найти зависимость выходной энергии пучка от изменения температуры секций (рис.2).

В табл.2 приведены недоборы энергии в зависимости от изменения температуры секций при предварительной настройке ускорителя на 75 МэВ. При изменении температуры на 0.5°C средняя энергия уменьшается более чем на

Табл.2. Зависимость величины уменьшения средней энергии пучка электронов от изменения температуры при настройке на энергию 75 МэВ

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\Delta E, \text{МэВ}$	0	0.017	0.069	0.156	0.277	0.432	0.623	0.848	1.107	1.401	1.73

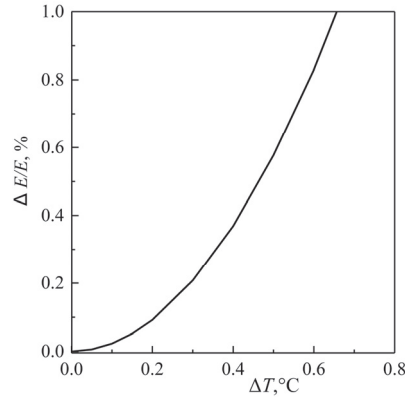


Рис.2. Зависимость относительного изменения выходной энергии пучка от изменения температуры ускоряющих секций.

0.4 МэВ, и для многих прецизионных экспериментов точность 0.5°C оказывается недостаточной. Из таблицы видно, что при стабильности температуры 0.2°C нестабильность энергии при 75 МэВ составляет около 70 кэВ или менее 0.1%. Такая точность поддержания температуры легко достижима при помощи ПИД-регулирования, которое успешно применяется на других ускорителях [6–8]. Готовые ПИД-регуляторы и управляемые тиристорные блоки различных мощностей выпускаются разными фирмами.

При выборе chillеров, теплообменников и мощностей нагнетающих насосов требуется знание потока охлаждающей воды или разность температур на выходе и входе охлаждаемого объекта. Связь между потоком и разностью температур на концах секции определяется из выражения

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{q\rho c}, \quad (4)$$

Здесь q , ρ , c – поток, плотность и теплоемкость воды, соответственно, ΔT – разность температур воды, ΔP – мощность СВЧ, теряемая на разогрев секции [5];

$$\Delta P = P_0[1 - \exp(-2\alpha L)], \quad (5)$$

где P_0 – мощность, поступающая на вход секции, α – коэффициент затухания высокочастотного поля, L – длина диафрагмированного волновода. Согласно паспортным данным ускоряющей секции, затухание ВЧ-мощности в секции, измеренное на рабочей частоте 2.7972 ГГц, равно 2.6 дБ (по техническим требованиям не более 3 дБ), т.е. $\alpha \approx 0.07 \text{ м}^{-1}$. Подставляя данные в формулу (5), получим, что мощность, выделяемая в стенках ускоряющего волновода равна $\Delta P = 0.45P_0$. С учетом того, что средняя мощность, подводимая ко входу секции, составляет в разных режимах от 1.5 до 2 кВт, $\Delta P = 0.7\text{--}0.9$ кВт. Согласно выражению (4), эта мощность приведет к увеличению средней температуры воды, проходящей через секцию, на величину $\Delta T = (1.67 - 2.14) \times 10^{-4}/q$ или $\Delta T = (10 - 12.9)/q$, если поток измерять в л/мин.

Измеренный поток воды, перекачиваемый через рубашку каждой секции линейного ускорителя, равен примерно 20 л/мин, что соответствует разности температур на концах секции (0.5–0.65)°C. Это превышение температуры надо устранить с помощью системы термостатирования.

Отметим, что приведенный расчет приближенный, не учитывает повышение

температуры помещения при включенном ускорителе, рассеяние тепла в подводящих трубах и др. Поэтому при проектировании приведенные величины должны учитываться с запасом и уточняться при испытательных работах.

В клистронах теряется больше энергии на тепло. Средняя мощность, поступающая от высоковольтного модулятора, порядка 6 кВт. КПД используемого клистрона (30–35)%, т.е. около 4 кВт превращается в тепло, выделяемое в коллекторе и в стенках резонаторного блока клистрона. Измеренный расход воды, охлаждающей клистрон, составляет $1.85 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ (11 л/мин). Подставляя в формулу (4) данные, получим $\Delta T = 5.1^\circ\text{C}$. Эта температура должна быть компенсирована системой охлаждения. Согласно инструкциям на многие современные чиллеры и теплообменники, эффективное их функционирование обеспечивается при разности температур на входе и выходе охлаждаемого объекта не более $\Delta T \leq 4\text{--}5^\circ\text{C}$. Следовательно, при модернизации следует увеличить поток воды, охлаждающей клистроны, установив более мощный насос. Отметим также, что опыт работы с клистроном показывает, что для них достаточна стабильность температуры в пределах $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Для быстрого вхождения в тепловой режим при включении «холодного» ускорителя, а также при переводе системы из одного режима в другой будущая система термостабилизации секций должна обеспечить быструю доводку температуры до выставленного значения. Выставленная температура воды на подачах в ускоряющие секции должна надежно поддерживаться с точностью $\pm 0.2^\circ\text{C}$ в течение многосуточного функционирования ускорителя. Уставка, регулировка и контроль температур подаваемой воды, должны быть обеспечены с ПК в пультовой комнате ЛУЭ-75.

3.3. Вакуумная система

На ЛУЭ-75, откачиваемыми объектами которой являются ускоряющие секции, действует трехступенчатая система откачки: низкий вакуум – форвакуумным насосом типа АВЗ-20Д, средний и высокий вакуум – турбомолекулярным насосом ТМН-200 и магниторазрядными насосами (МРН) типа НЭМ-300; обеспечивается рабочий вакуум не хуже 10^{-6} Торр. Трехступенчатая система позволяет после получения рабочего вакуума отключить все механические насосы за исключением МРН, которые поддерживают высокий вакуум не только во время экспериментов, но и в многодневных перерывах между пучковыми сеансами.

Величина натекания, согласно паспортным данным ускоряющей секции, составляет не более 5×10^{-4} Торр/час. На рис.3б приведен график изменения низкого вакуума в ускоряющей системе ЛУЭ-75 после отключения форвакуумного насоса. Измерения выполнялись с помощью термопарного манометрического преобразователя ПМТ-4М и вакуумметром ВИТ-1А. Используя градуировочную кривую преобразователя, переводящего показания в милливольты (ось ординат на рис.3) в единицы давления в Торр, найдем, что за первые 10 дней после отключения (крутой участок графика рис.3б) натек составляет 2.6×10^{-4} Торр/час, что с учетом погрешностей измерения термопары согласуется по порядку с паспортным значением для секции. Время получения предварительного вакуума (рис.3а) в системе составляет не менее одного

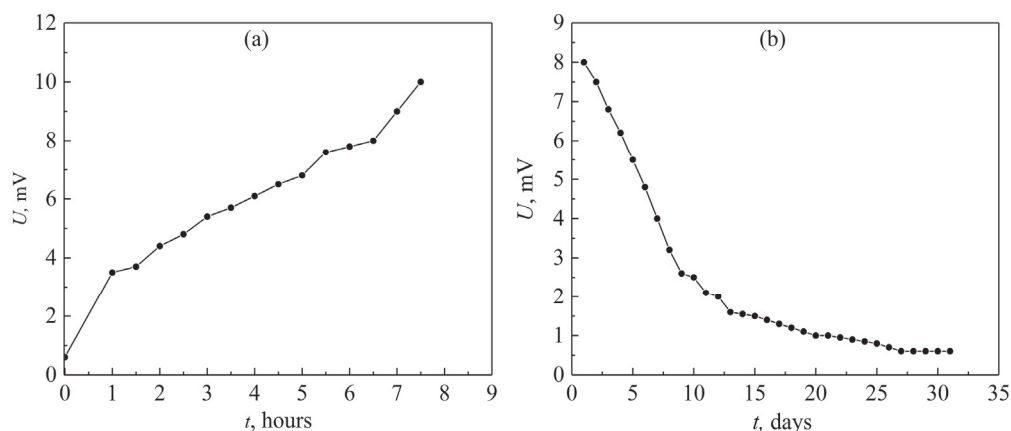


Рис.3. Изменение вакуума при (а) включении и (б) отключении форвакуумного насоса; U – показания измерителя давления ПМТ-4М.

рабочего дня. Это объясняется уменьшением производительности насосов из-за их физического износа.

Подобная ситуация наблюдается и в области высокого вакуума. На каждой секции ЛУЭ-75 установлено по одному МРН. Оценим необходимую производительность высоковакуумных насосов. Объемный поток откачиваемого газа

$$S = Q p, \quad (6)$$

где Q – производительность насоса (быстрота откачивания) и p – рабочее давление в секции. Для используемых МРН согласно техническим характеристикам $Q = 250$ л/с, рабочее давление на линейном ускорителе $p = 10^{-6}$ Торр. Подставляя данные в (6), получим $S = 2.5 \times 10^{-4}$ Торр л/с. Объемный поток натекающего газа с учетом вышеприведенного значения натекания и, приняв объем одной секции с различными отводами и камерами примерно равным 20 л, составляет менее 2×10^{-6} Торр л/с. Как видим, объемный поток откачиваемого газа во много раз больше натекания в секцию (либо извне, либо из-за десорбции с внутренних поверхностей секции), что является необходимым требованием для любой вакуумной установки. Таким образом, указанные производительности МРН насосов 250 л/с для каждой секции достаточны для откачки вакуумного объема ускоряющего тракта.

Технические характеристики МРН насосов в течение длительного периода использования ухудшились и производительность снизилась. При разборке насосов обнаруживается выход из строя части электродов (некоторые титановые пластины оказываются пробитыми по всей поверхности), что приводит к потере производительности, а со временем и к выходу из строя насоса. По мере эксплуатации времязатратность получения рабочего вакуума увеличивается, соответственно увеличивается и потребление электроэнергии. Используемые марки вакуумных насосов в настоящее время не производятся. Ввиду вышеизложенного, возникла необходимость модернизации вакуумной системы.

При модернизации необходимо произвести некоторые конструктивные изменения в цепях, содержащих вакуумную арматуру. Конфигурация вакуумной арматуры (соединительные трубы, вакуумные вентили и др.) была выполнена с учетом работы совместно с синхротроном. Поскольку в настоящее время

линейный ускоритель работает в автономном режиме, следует внести конструктивные изменения, к примеру, форвакуумный насос установить непосредственно в зале ускорителя. Основное уравнение вакуумной техники имеет вид [9, 10]

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_p} + \frac{1}{U}, \quad (7)$$

где Q_0 – скорость откачки объема, Q_p – быстрота действия насоса, $U = 1/R$ – проводимость трубопровода, и R – гидравлическое сопротивление трубопровода. Из уравнения (7) следует, что скорость откачки зависит также и от гидравлического сопротивления трубопровода. Гидравлическое сопротивление в свою очередь зависит от длины и диаметра трубопровода. Все МНР и турбомолекулярные насосы подключены к системе короткими патрубками с диаметром, большим диаметра секций. Поэтому для них можно считать гидравлическое сопротивление малым и $Q_0 \approx Q_p$ и коэффициент использования этих насосов

$$K = \frac{Q_0}{Q_p} \approx 1.$$

Форвакуумный насос расположен вдали от ускоряющих секций – это масляный насос, установленный вне ускорительного зала, что значительно уменьшает коэффициент его использования, $K < 1$.

Планируется форвакуумный насос заменить на насос безмасляного типа для исключения попадания паров масла в ускоряющую систему и смонтировать его непосредственно в ускорительном зале.

При модернизации идеология трехступенчатой системы откачки сохранится. Вышедшие из производства насосы и соответствующая вакуумная измерительная аппаратура будут заменены на современные, оснащенные контроллерами, дающими возможность проводить компьютерный мониторинг и управление непосредственно из пультной комнаты (рис.4). Это важно при работе в радиационной обстановке и для создания системы сбора данных (DAQ-системы). Повысится эффективность работы вакуумной системы, ее надежность, уменьшится времязатратность, а также потребляемая электроэнергия.

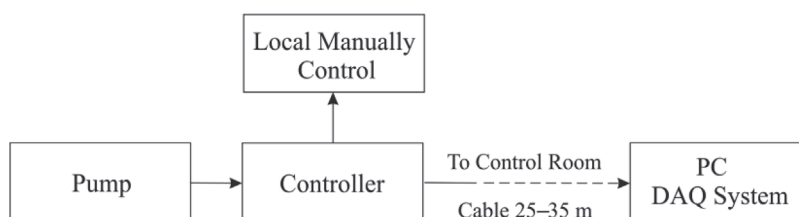


Рис.4. Схема управления вакуумным насосом.

4. Заключение

В результате планируемой модернизации ожидается: повышение устойчивости параметров пучка – долговременной стабильности энергии при длительных сеансах, а следовательно, и интенсивности; экономия потребляемой ускорителем электроэнергии; сокращение времени вхождения в тепловой и вакуумный режимы; станет возможным компьютерный мониторинг и создание

системы сбора данных, как необходимого начального этапа автоматизации, что уменьшит времязатратность при обнаружении и устранении возможных неполадок.

Улучшение стабильности энергии пучка и его интенсивности позволит проведение прецизионных экспериментов, создаст возможность обнаружения и изучения редких процессов распада в ядерной физике низких энергий. Для примера укажем работу [11 и ссылки в ней], в которой на основе пучков ЛУЭ-75 сотрудниками ННЛА (ЕрФИ) осуществлен поиск околорогового образования четырехнейтронной системы в фотоядерной реакции $^{209}\text{Bi}(\gamma, 4n)^{205}\text{Bi}$. Впервые были определены сечения реакции этого редкого процесса. Исследование по установлению факта существования гипотетического связанного состояния нейтронов (тетранейтрона) возможно продолжить, по утверждению авторов, лишь при улучшении стабильности энергии и интенсивности пучка.

Это важно также и в изотопной физике, в частности, при получении и исследовании тераностических радиоизотопов, где надо получить данный изотоп, исключая образование других, близко отстоящих по порогу реакций.

Автор выражает благодарность А.С. Акопяну за ценные замечания и консультацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Г. Оксюзян, Э.М. Лазиев, В.Л. Серов, В.И. Белоглазов, И.А. Гришаев, Т.Ф. Никитина, Л.Н. Сдобнова. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра, **4**, 67 (ХФТИ АН УССР) (1973).
2. A.S. Hakobyan. J. Contemp. Phys., **56**, 169 (2021).
3. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, H.H. Hakobyan, A.Z. Babayan, L.R. Vahradyan, V. Baranov, Yu.I. Davydov, A. Krasnoperov, A. Simonenko, V. Tereshchenko, H.T. Torosyan, H.G. Zohrabyan, G.M. Ayvazyan, H.S. Vardanyan, A.K. Papryan. J. Contemp. Phys., **57**, 12 (2022).
4. V.D. Bochkov, D.V. Bochkov, I.A. Salynov, V.N. Nikolaev, A.S. Krestianinov, S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin, A.P. Ponizovsky. Particles and Nuclei, Letters, **15**, 894 (2018).
5. О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин. Диафрагмированные волноводы. Москва, Энергоатомиздат, 1991.
6. K.V. Gubin, V.D. Hambikov, A.G. Igolkin, P.V. Martyshkin. Thermostabilization System of VEPP-5 Preinjector. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, pp. 1456–1458 (1999).
7. S. Tunyan, G. Amatuni, B. Grigoryan. Temperature Regulation of the Accelerating Section in Candle Linac, Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, USA, pp. 1416–1418 (2005).
8. V.N. Zamriy, A.P. Sumbaev. Precision Thermostatic Control for LUE-200 Accelerator Section, Proceedings of RUPAC, pp. 629–631 (2012).
9. В.И. Иванов. Вакуумная техника. СПб, Университет ИТМО, 2016.
10. Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова, И.В. Автономова, К.Е. Демихов, Г.Ф. Ивановский, В.И. Куприянов, Н.К. Никулин, Ю.М. Пустовойт, И.В. Творогов, А.Б. Цейтлин. Вакуумные технологии. Справочник. Москва, Машиностроение, 1992.

11. T.V. Kotanjyan, A.Y. Aleksanyan, A.O. Kechechyan, S.M. Amirkhanyan, H.R. Gulkanyan, V.S. Poghosov, L.A. Poghosyan. J. Contemp. Phys., **58**, 6 (2023).

ԱԱԳԼ (ԵՐՖԻ) -Ի ԼՈՒԷ-75 ԳԾԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑՉԻ
ԱՐԴԻԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Լ.Ռ. ՎԱՀՐԱԴՅԱՆ

Համառոտ նկարագրված է Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայի ԼՈՒԷ-75 գծային արագացուցչային համալիրի գիտատեխնիկական վիճակը վերջին տարիներին կատարված վերանորոգման աշխատանքներից հետո: Հիմնավորված է հիմնական համակարգերի հետագա արդիականացման անհրաժեշտությունը արագացուցչի երկար գիտական կյանքն ապահովելու համար: Կատարվել է արագացուցչի առանձին հանգույցների և համակարգերի վիճակի վերլուծությունը, բերված են հաշվարկային տվյալներ, որոնց հիման վրա առաջարկվում է արդիականացնել ժամանակակից տեխնիկայի ներդրմամբ: Առաջարկվում է օգտագործել նոր սերնդի ուժային էլեկտրոնիկա, ժամանակակից ինտերֆեյսով օժտված վակուումային սարքավորումներ, նոր ջերմակայունացման համակարգ:

ON MODERNIZATION OF THE LUE-75 LINEAR ELECTRON
ACCELERATOR OF THE AANL (YERPHI)

L.R. VAHRADYAN

Briefly presented the scientific and technical state of the linear accelerator complex of the National Scientific Laboratory. A. Alikhanyan LUE-75 after renovation work carried out in recent years. The need for further modernization of the accelerator's main systems to ensure its long scientific life is substantiated. An analysis of the state of individual nodes and systems of the accelerator and calculations have been carried out, on the basis of which modernization is proposed by the introduction of modern technology. The use of new generation power electronics, vacuum equipment with a modern interface and thermostabilization system is offered.