УДК 621.384

# СТАТУС ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-75 НАЦИОНАЛЬНОЙ НАУЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИМ. А. АЛИХАНЯНА И СТАБИЛЬНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

# А.С. АКОПЯН\*

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

### \*e-mail: ashothako@yerphi.am

(Поступила в редакцию 1 июня 2021 г.)

Представлен научно-технический статус линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А. Алиханяна после проведенных реновационно-восстановительных работ и рассмотрены некоторые расчетные данные влияния частотных, фазовых и температурных изменений тракта высокочастотного питания и ускоряющей системы на стабильность энергии электронного пучка, связанные с задействованием дополнительной ускорительной станции.

#### 1. О статусе ЛУЭ-75

Электронный ускоритель ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А. Алиханяна (ННЛА, Ереванский физический институт – ЕрФИ), протонный медицинский ускоритель – циклотрон С-18 с возможностью проведения физических экспериментов, а также уникальный линейный ускоритель AREAL Института синхротронных исследований CANDLE, позволяют Армении оставаться региональным центром применения ускорительной физики и техники в области фундаментальных и прикладных научных исследований [1,2].

Резонансный ускоритель электронов на бегущей волне десятисантиметрового диапазона ЛУЭ-75 – инжектор ереванского 6-ти ГэВ-ного синхротрона АРУС (рис.1), работа кольцевой части которого в настоящее время приостановлена – функционирует автономно в качестве единственного базового комплекса экспериментального отделения ННЛА для изучения актуальных задач низкоэнергетической ядерной физики в диапазоне энергий 10–75 МэВ.

В качестве источника электронов в ЛУЭ-75 используется термоэлектронная пушка с оптикой Пирса, с выхода которой 50 кэВ-ный пучок поступает на вход волноводного группирователя (инжекторную секцию). В группирователе в процессе автофазировки равномерно распределённый по фазам волны поток электронов группируется в сгустки (модулируется по плотности) с частотой следования, равной частоте СВЧ-ускоряющего поля и одновременно ускоряется до



Рис.1. Схема синхротронного кольца АРУС.

энергии 3 МэВ; дальнейшее ускорение осуществляется тремя идентичными основными ускоряющими секциями (рис.2), в которые поступает СВЧ-энергия от трёх мощных клистронных постов. Первый клистрон работает по схеме



Рис.2. Ускоряющие секции ЛУЭ-75.

автогенератора, предложенной специалистами ЕрФИ еще в 70-х годах [3], снабжая остальные клистроны, работающие в усилительном режиме, входной мощностью. Преимуществом автогенераторной системы питания ЛУЭ-75 является эксплуатационная надежность, простота, отсутствие дорогостоящего внешнего драйвера. При необходимости имеется возможность работы и в режиме внешнего возбуждения мощных пролетных клистронов.

При работе синхротрона линейный ускоритель в качестве инжектора запускался от системы управления процессами электронно-кольцевого ускорителя (ЭКУ) синхронно с частотой питания электромагнитов ЭКУ с номинальной частотой посылок 47–49 Гц. В автономном режиме система синхронизации питается и запускается синхронно от той же стабильной сети, что и высоковольтные модуляторы СВЧ генераторов и электронной пушки, чем исключается возникновение биений. Номинальная частота следования запускающих импульсов равна 50 Гц. Импульсный режим ускорителя приводит к двойной модуляции электронного потока. Временная структура пучка представлена на рис.3.



Рис.3. Временная структура пучка ЛУЭ-75.

Ускоритель предоставляет экспериментаторам электронные пучки со средним током до 10 мкА (без коллимации), что соответствует импульсному току до 150–200 мА в зависимости от длительности макроимпульса и энергии. Коллимированный и хорошо сгруппированный пучок на номинальных энергиях имеет ширину энергетического спектра (FWHM) порядка 2%. Подробно параметры линейного ускорительного комплекса ЛУЭ-75, включающего собственно линейный ускоритель и тракт транспортировки с параллельным переносом (рис.4), расположенный в кольцевом зале синхротрона, представлены в статьях [4–6].

В последние годы были проведены некоторые реновационно-восстановительные работы [4], в частности, была восстановлена и задействована 3-я ускорительная станция, включающая ускоряющую секцию, клистронный пост с волноводным трактом и высоковольтным импульсным модулятором, а также системы их обеспечения. Благодаря проведенным работам энергия электронов на выходе была доведена до 75 МэВ, что создало возможность изучения фотоядерных процессов при реакциях, имеющих более высокий энергетический порог; была повышена надежность функционирования узлов при длительных сеансах.

ЛУЭ-75 является однооборотным ускорителем и вместе с трактом параллельного переноса пучка имеет длину порядка 45 м. Направление движения пучка примерно совпадает с направлением восток-запад, т.е. почти перпендикулярно магнитным силовым линиям Земли (рис.1). Для устранения влияния геомагнитного поля на пучок были изготовлены и установлены на вновь задействованную ускоряющую секцию протяженные корректирующие катушки, компенсирующие смещение центра тяжести пучка в горизонтальной и



Рис.4. Схема расположения тракта транспортировки и параллельного переноса в синхротронном зале. МА – дипольный анализирующий магнит 90° на выходе ЛУЭ-75; FC – цилиндр Фарадея; К1– коллиматор; М1, М2 – поворотные магниты параллельного переноса; М3 – отклоняющий магнит (beam dump), используемый для получения фотонных пучков; Q1...Q9 – квадрупольные линзы; ЕА– экспериментальные зоны.

вертикальной плоскостях; тем самым нейтрализуется также влияние расположенных вблизи ферромагнитных масс и разных источников полей.

Тракт транспортировки с параллельным переносом пучка расположен в синхротронном зале вдали от помещения ЛУЭ-75 за его радиационно-защитной стеной (рис.4), где существенное уменьшение радиационного фона при отключенном синхротроне и, практически, отсутствие влияния электромагнитных помех и наводок от электрорадиотехнических устройств линейного ускорителя на измерительную аппаратуру, создали благоприятные низкофоновые условия для проведения прецизионных экспериментов. Проведена модернизация элементов магнитной оптики тракта параллельного переноса.

Разработана методика получения уникальных пучков экстремально низкой интенсивности порядка десятков электронов в секунду в диапазоне энергий 15–75 МэВ. Такие пучки на ЛУЭ-75 применялись в качестве тестовых с числом одноэлектронных событий более 70% для калибровки кристаллических детекторов элементарных частиц в рамках совместных договорных работ ННЛА (Ереван) – ОИЯИ (Дубна) [4,5,7,8]; пучки экстремально низкой интенсивности могут применяться для изучения отдельных событий, исследования биологических эффектов ионизирующей радиации в малых дозах, дифракционных задач и др. Создана также возможность получения фотонных пучков с помощью отклоняющего электромагнита МЗ (рис.4) в самом конце тракта. При выполнении работ в основном использовалась наличная технико-технологическая база ННЛА.

Параметры пучка и их стабильность, определяющие качество эксперимента, зависят от различных факторов [9–12]. В связи с включением на выходе ускорителя 3-й ускорительной станции с дополнительной секцией ниже рассматривается влияние частотных, фазовых и температурных изменений на стабильность энергии электронного пучка на выходе ускоряющей секции ЛУЭ-75.

#### 2. О стабильности энергии электронного пучка

Одним из важных параметров электронного пучка является стабильность энергии и энергетический разброс пучка, оцениваемый шириной энергетического спектра, определяющей степень монохроматичности пучка. Устойчивость ускорения зависит от начальных условий на входах ускоряющих секций.

Рассмотрим зависимость относительного прироста энергии пучка от начальной фазы волны на входе в ускоряющую секцию. С целью получения максимального ускорения при настройке ускорителя начальная фаза частиц, т.е. фаза волны, в которой оказываются частицы в начале каждой из основных ускоряющих секций, выбирается так, чтобы сгустки оказались вблизи гребня основной гармоники ускоряющей волны. Изменение начальной фазы приводит к смещению центра тяжести сгустков от оптимального положения, что приводит к недобору энергии на выходе секции. С увеличением ошибки фазирования увеличивается энергетический разброс пучка. Для типового режима ЛУЭ-75 на рис. 5 приведены расчетные кривые зависимости относительного прироста энергии от начальной фазы при одинаковой амплитуде ускоряющих полей и неизменной частоте генератора поля для трех основных секций, на входы которых пучок поступает с разными энергиями. Оптимальные фазы секций отличаются, в зависимости от кинетической энергии влетающих в них частиц, но с увеличением входной энергии кривые практически сливаются, и оптимальное значение начальной фазы электронов близка к нулю.



Рис.5. Зависимость относительного прироста выходной энергии электронов от начальной фазы ускоряющей волны для основных ускоряющих секций линейного ускорителя; сплошная кривая – на входе 1-ой секции 3 МэВ; точки – на входе II-ой секции 25 МэВ; штриховая – на входе III-ей секции 50 МэВ.

При небольших отклонениях от оптимальной для каждой секции начальной фазе относительное изменение энергии на выходах примерно одинаково, но с увеличением отклонения вновь задействованная секция, в которую влетают частицы с энергией 50 МэВ, как и вторая секция с входным 25 МэВ-ным пучком, более критичны относительно изменения начальной фазы: при одном и том же отклонении фазы недобор энергии оказывается больше, чем для первой секции, в которую электроны влетают с энергией 3 МэВ. ЛУЭ-75 – ускоритель бегущей волны и с точки зрения СВЧ электродинамики является прибором длительного взаимодействия. С увеличением энергии время пролета через секцию – время взаимодействия пучка с ускоряющей волной – уменьшается, и одно и то же отклонение по какой-либо причине от оптимальной начальной фазы, приводит к большему недобору энергии на выходе (ср. кривые на рис.5). Аналогично можно объяснить и разницу в поведении семейства кривых, приведенных в [9], где дана зависимость относительного прироста энергии от начальных условий, но при разных амплитудах ускоряющей волны.

Отклонения от оптимального значения могут быть при неправильном фазировании секции. Более наглядно влияние начальной фазы частицы на энергию можно показать, построив кривые зависимости относительного изменения энергии пучка (изменения относительного прироста энергии) на выходе ускоряющей секции от начальной фазы при небольшом отклонении последней от установленной, к примеру, на 1°. Приведенные на рис. 6 кривые построены для трех основных ускоряющих секций при постоянной частоте генератора и одинаковой амплитуде СВЧ поля на входах при отклонении фазы от установленной на 1°.



Рис.6. Относительное изменение энергии частиц на выходе секции при отклонении начальной фазы инжекции от установленного значения на 1° для основных секций; параметром служит энергия частиц на входе секции. Сплошная кривая – на входе 1-ой секции 3 МэВ; точки – на входе 2-ой секции 25 МэВ; пунктирная – на входе 3-й секции 50 МэВ.

Из графиков видно, что чем больше ошибка фазирования, тем больше относительное изменение выходной энергии частиц при отклонении начальной фазы электронов на 1° от установленного, причем при небольших ошибках фазирования относительные изменения энергии на выходах секций примерно одинаковы, но с увеличением ошибки вторая и третья секции становятся более критичными по сравнению с первой, на вход которой поступает пучок с намного меньшей энергией. Так, при одинаковой ошибке фазирования в 50° отклонение всего на 1° от установленного приводит к изменению энергии на выходе первой секции на 1%, а на выходе третьей секции на 2%. Однако, такая ошибка фазирования приводит к неустойчивости ускорения и обнаруживается по нестабильности тока пучка, измеряемого после магнитного анализатора, и неверная установка фазы устраняется ее регулированием.

Кривые рис.5 и 6 показывают, что при небольших отклонениях начальной фазы от оптимальной энергетический разброс пучка примерно одинаков для всех трех секций с разными энергиями электронов на входах; так, изменение фазы на  $\pm 8^{\circ}$  от оптимального значения приводит к относительному изменению энергии  $\pm 1\%$ .

Дополнительное уширение энергетического спектра появляется также изза дисперсионных свойств волноводного тракта. В процессе работы ускорителя частота генератора ускоряющего поля может изменяться под воздействием внешних факторов – питающих напряжений, температуры, что приведет к изменению фазовой скорости волны в волноводе. Появятся дополнительные фазовые сдвиги на входах ускоряющих секций и фазовое скольжение сгустков электронов относительно ускоряющей волны в секциях. Фазовое скольжение сгустков приводит к увеличению разброса энергии электронов, что рассмотрено в литературе [9–12], для ЛУЭ-75 – в [4]. Здесь рассмотрим фазовые сдвиги между секциями, возникающие из-за неодинаковых длин волноводных линий передачи.

Волноводные линии передачи высокого уровня мощности от клистронов до ускоряющих секций имеют примерно одинаковую длину; поэтому отклонение частоты генератора по какой либо причине от установленной при настройке на входах секций возникают одинаковые фазовые сдвиги. Линии возбуждения клистронов, собранные в основном из прямоугольных волноводов сечением  $(72 \times 34)$  мм<sup>2</sup> и проложенные от 1-го клистрона к остальным двум, имеют разные длины – 7.2 м и 11.5 м соответственно. Используется основная волна в прямоугольном волноводе H<sub>10</sub>. Небольшие отрезки коаксиальных линий с TEM- волной дисперсностью не обладают. На рис.7 приведены зависимости дополнительных фазовых сдвигов между ускоряющими секциями от величины отклонения частоты генератора  $\Delta f$ , возникающих из-за дисперсности волноводных линий возбуждения клистронов. С увеличением длины линии возбуждения кривая идет круче. К примеру, отклонение частоты генератора в пределах  $\pm 100$  кГц (что возможно при длительных сеансах) вызывает изменение фазового сдвига между 1-ой и 2-ой секциями  $\pm 1.3^{\circ}$ , а между 1-ой и 3-ей (вновь задействованной) секциями  $-\pm 2^{\circ}$ , что привносит свой вклад в нестабильность энергетического спектра.

Фазовый сдвиг возникает также при изменении температуры волноводного тракта из-за изменения его геометрических размеров. На рис.8 приведена расчетная зависимость фазового сдвига из-за изменения температуры волноводного тракта высокого уровня мощности (общей длиной 30 м) для основной волны в прямоугольном волноводе сечением 90×45 мм<sup>2</sup> при неизменной рабочей частоте. Расчеты показывают, что в широких пределах рабочей температуры волноводного тракта фазовый сдвиг практически не зависит от значения



Рис.7. Зависимость дополнительного фазового сдвига в градусах из-за дисперсности линий возбуждения клистронов от смещения частоты генератора от рабочей частоты: сплошная кривая – между 1-ой и 2-ой секциями; точки – между 1-й и 3-й секциями.

температуры, при которой была осуществлена настройка ускорителя, а зависит от ее изменения: изменение геометрических размеров приводит к изменению длины волны в волноводе, что в свою очередь приводит к изменению электрической длины питающего ускоряющие секции волноводного тракта. Из графика видно, что изменение температуры на  $\pm 0.5^{\circ}$ С приводит к изменению начальной фазы  $\pm 1^{\circ}$ . Такое отклонение начальной фазы от оптимальной привносит несущественное изменение энергии – около 0.014%.



Рис.8. Зависимость фазового сдвига от температуры волноводного тракта.

На устойчивость энергии и тока пучка действует также стабильность частоты запускающих импульсов, синхронизированных с питающей ускоритель стабильной сетью; последняя в свою очередь работает синхронно с промышленной сетью. Изменение частоты промышленной сети приводит к изменению среднего тока мощных клистронов, что привносит свой вклад в нестабильность пучка. Изменение среднего тока устраняется соответствующей подстройкой. Нестабильность частоты промышленной сети наблюдается редко даже при непрерывных многодневных сеансах.

#### 3. Заключение

Полученные результаты учитывались при наладке и настройке ускорителя после пуска 3-ей ускорительной станции. Потребовалось доработать систему фазирования вновь задействованной ускоряющей секции включением дополнительного переменного волноводного фазовращателя в линию возбуждения генератора для установления и поддержания в необходимых пределах относительного фазового сдвига СВЧ колебаний на входе этой секции. С включением модулятора и клистронного поста для работы в режиме 50–75 МэВ потребовалось доработать системы охлаждения и термостатирования.

Приведенные выше расчетные данные и практические работы на ускорителе показывают, что с включением дополнительной ускоряющей секции повышаются требования к стабильности частоты генератора и фазовых соотношений, к оптимальному выбору которых практически сводится настройка ЛУЭ-75, как и любого ускорителя. Заметим, что неустойчивость ускорения, вызванная изменением частоты ускоряющего поля, суммируется с неустойчивостью от других факторов. Повышаются требования к системе синхронного питания ускорителя.

Хотя экспериментальные работы, осуществляемые в последние годы на ЛУЭ-75 [7,13–15], показали его надежную работу, с целью улучшения параметров планируется разработать новую систему термостатирования секций и охлаждения узлов ускорителя с применением ПИД-регулирования и модульной схемы стабилизации; такая схема позволит обеспечить не только автоматическое поддержание температуры секций и генераторных узлов в заданных пределах, но также оперативность и точность установления температур при изменении режимов линейного ускорителя.

В настоящее время ускоритель находится в рабочем состоянии и предоставляет электронные пучки для задач низкоэнергетической ядерной физики и научно-методических исследований. Ускоритель может служить и для учебнообразовательных целей. Планируются работы по модернизации ускорителя с внедрением современной вакуумной техники, силовой электроники и измерительной базы, что повысит качество пучка, а значит, и востребованность ЛУЭ-75 для прецизионных экспериментов. Это позволит расширить круг решаемых на ускорителе актуальных научно-исследовательских задач.

Автор выражает благодарность Л.Р. Ваградян за оказанную помощь при написании статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. I. Kerobyan, H. Marukyan. J. Contemp. Phys., 55, 8, (2020).
- M.I. Ivanyan, V.A. Danielyan, B.A. Grigoryan, A.H. Grigoryan, A.V. Tsakanian, V.M. Tsakanov, A.S. Vardanyan, S.V. Zakaryan. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 829, 187 (2016).
- Г.Г. Оксузян, 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(6), 67 (1973). (ХФТИ АН УССР).
- 4. A.M. Sirunyan, A.S. Hakobyan, A.Z. Babayan, H.H. Marukyan, H.G. Mkrtchyan,

K.D. Davtyan, H.L. Arutyunov, G.M. Ayvazyan, S.K. Avagyan, V.H. Martirosyan, A.A. Margaryan, G.G. Khachatryan, L.R. Vahradyan. J. Contemp. Phys., 54, 225 (2019).

- 5. A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan, A. Papyan. J. Contemp. Phys., 53, 271 (2018).
- 6. Р.О. Авакян, А.Э. Аветисян, А.З. Бабаян, К.А. Испирян, В.Ц. Никогосян, С.П. Тароян. Изв. НАН Армении, Физика, 45, 69 (2010).
- 7. A. Artikov, A. Babayan, V. Baranov, J. Budagov, Yu. I. Davydov, V. Glagolev, A. Hakobyan, H. Hakobyan, D.G. Hitlin, S. Miscetti, T. Mkrtchian, A. Simonenko, A. Sirunyan, A. Shalyugin, V. Tereschenko, H. Torosyan, Z. Usubov, H. Zohrabyan. Tests of undoped CsI matrix with an extremely low intensity electron beam. Conference New Trends in High Energy Physics, Budva, Montenegro, p.24, September 2018, http://indico.jinr.ru/contributionDisplay.py?contribId=111&confId=410.
- 8. Ю.И. Давыдов. Требования к пучку для тестирования детекторов (для кристаллов CsI в частности), опыт работы в Ереване. https://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=363.
- 9. О.А. Вальднер, А.Д. Власов, А.В. Шальнов. Линейные ускорители. Москва: Атомиздат, 1969.
- 10. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов. Основы физики и техники ускорителей. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
- 11. **О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин.** Справочник по диафрагмированным волноводам. Москва: Атомиздат, 1969.
- 12. Е.Г. Комар. Основы ускорительной техники. Москва: Атомиздат, 1975.
- Y. Aleksanyan, S.M. Amirkhanyan, A. Balabekyan, N.A. Demekhina, H.R. Gulkanyan, T.V. Kotanjyan, V. Mangasaryan, V.S. Pogosov, L.A. Poghosyan, S. Faltajanyan, J. Contemp. Phys., 55, 275 (2020).
- 14. Р.О. Авакян, А.Е. Аветисян, И.А. Керопян, С.П, Тароян, А.С. Данагулян, Р.М. Мирзоян, К.С. Бунятов, Р.Ц. Саркисян, С.А. Галумян, В.С. Еганов, А.А. Оганесян, Г.С. Вартанян, В.Б. Гавалян, В.Ц. Никогосян, В.С. Айрапетян, А.З. Бабаян, А.А. Матосян, С.В. Жамкочян. Изв. НАН Армении, Физика, 47, 9, (2012).
- 15. А.Р. Мкртчян, А.Г. Мкртчян, Л.Ш. Григорян, А.А. Саарян, А.А. Асланян, Э.М. Арутюнян, С.П. Тароян, В.Ц. Никогосян, В.Р. Кочарян, Г.А. Айвазян, В.В. Налбандян, Т.Г. Довлатян, А.Е. Мовсисян, Э.А. Мкртчян, О.Р. Мурадян, С.А. Миракян. Изв. НАН Армении, Физика, 48, 236 (2013).

# STATUS OF ELECTRON LINEAR ACCELERATOR LUE-75 OF THE A. ALIKHANYAN NATIONAL SCIENCE LABORATORY AND STABILITY OF ELECTRON BEAM ENERGY

#### A.S. HAKOBYAN

The scientific and technical status on upgrade of the linear electron accelerator LUE-75 of the A. Alikhanyan National Science Laboratory is presented. Some calculated data on the effect of frequency, phase and temperature changes of the high-frequency power supply path and the accelerating system on the stability of the electron beam energy associated with the use of an additional accelerating station are considered.