

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ЛИУ-30**RISE OF RELIABILITY FOR LIU-30 FACILITY OPERATION**

*Н. В. Завьялов, В. Ф. Басманов, В. Т. Пунин, И. З. Мусин, В. С. Гордеев,
С. А. Горностай-Польский, А. А. Васюнин, В. П. Грицына, А. В. Жильцов, О. В. Забелин,
О. В. Зверев, Н. А. Колокольникова, В. В. Кульгавчук, Е. Н. Логинова, С. Т. Назаренко, Ю. И. Никоноров,
А. А. Петров, Д. В. Репин, С. В. Савельев, В. Н. Яновский
N. V. Zavyalov, V. F. Basmanov, V. T. Punin, I. Z. Musin, V. S. Gordeev, S. A. Gornostai-Pol'skii,
A. A. Vasyunin, V. P. Gritsyna, A. V. Zhiltsov, O. V. Zabelin, O. V. Zverev, N. A. Kolokol'nikova,
V. V. Kul'gavchuk, E. N. Loginova, S. T. Nazarenko, Yu. I. Nikonorov, A. A. Petrov, D. V. Repin, S. V. Saveliev,
V. N. Yanovskii*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental
Physics (RFNC-VNIIEF)

На линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-30 в 2013 г. завершена модернизация всех ускорительных блоков индукторов. Анализ работы ускорителя ЛИУ-30 в 2014 и 2015 годах показал, что число отказов ускорительных блоков индукторов уменьшилось на порядок. Это позволило повысить надежность установки ЛИУ-30 в наиболее востребованных режимах работы с генерированием близких к предельно возможным выходных доз и мощностей доз тормозного излучения.

Modernization of all accelerating inductors' units was finished on the linear induction electron accelerator LIU-30 in 2013. The analysis of LIU-30 accelerator operation in the years of 2014 and 2015 proved that the number of failures of accelerating inductors' units reduced by an order. This allowed a rise of reliability of LIU-30 facility in the most relevant operation modes involving generating of close to maximum possible output doses and bremsstrahlung dose rates.

Установка ЛИУ-30 [1, 2], введенная в эксплуатацию в 1988 г., имеет многомодульную структуру системы инжекции и системы ускорения релятивистского электронного пучка (РЭП). На рис. 1 приведена одна из рабочих конфигураций ускорительного тракта установки ЛИУ-30. Каждый ее модуль оснащен автономным питанием и управлением. В состав модуля входят один блок с четырьмя индукторами на радиальных линиях (РЛ) с водяной изоляцией, имеющих общую ускорительную трубку, и два генератора импульсных напряжений (ГИН), выполненных по схеме Аркадьева-Маркса. Изоляторы 1 ускорительных трубок всех блоков индукторов размещены последовательно друг за другом и герметично состыкованы. Всего в герметичном ускорительном тракте с достигаемым давлением остаточных газов порядка 10^{-2} Па тракте установки ЛИУ-30 может быть использовано до тридцати шести таких модулей. Почти на всем протяжении этого тракта создается импульсное продольное магнитное поле с индук

цией до 0,6 Тл. Безотказная согласованная работа всех модулей позволяет сформировать в системе инжекции релятивистский электронный пучок (РЭП) с импульсом тока амплитудой до 100 кА при длительности около 30 нс и ускорить его в ускоряющей системе до граничной энергии электронов ≤ 40 МэВ. В каждом индукторе есть две РЛ, образованные центральным высоковольтным дисковым электродом в виде кругового кольца и заземленным тороидальным экраном, разомкнутым на внутреннем диаметре. Энергия в каждой паре индукторов запасается при зарядке их электрической емкости за время менее одной микросекунды от ГИН до напряжения 500 кВ. При замыкании зазора одной из РЛ управляемыми разрядниками 2 тригатронного типа, расположенными равномерно по азимуту, на выходе индуктора формируются импульсы напряжения чередующейся полярности. Рабочим является первый импульс напряжения.

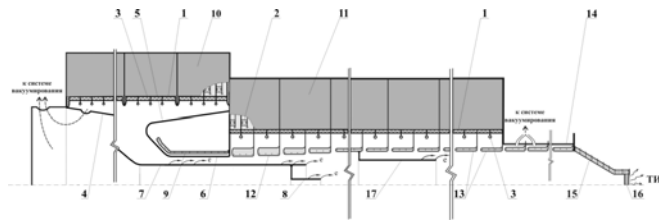


Рис. 1. Конфигурация ускорительного тракта установки ЛИУ-30: 1 – ускорительная трубка; 2 – управляемый разрядник тригatronного типа; 3 – градиентные электроды изоляторов ускорительных трубок; 4 и 5 – конусообразные держатели катода и анода, соответственно; 6 – цилиндрический участок анода; 7 и 8 – участки катода; 9 – анодный соленоид; 10 и 11 – инжекторный и ускорительный блоки индукторов, соответственно; 12, 13 – труба дрейфа с соленоидом; 14 – секция транспортировочного тракта; 15 – фокусирующее устройство; 16 – мишенный узел; 17 – дополнительный катод; е – электронные потоки; ТИ – тормозное излучение

Для коммутации РЛ всех индукторов используется более двух тысяч четырехсот разрядников, включаемых с наносекундной точностью по заданной временной программе. Импульсы напряжения с выходов индукторов прикладываются к изоляторам ускорительных трубок блоков. Эти изоляторы секционированы кольцеобразными элементами торцевых фланцев блоков и кольцеобразными градиентными электродами 3. С торцевыми фланцами первого и последнего блоков, ограничивающих часть системы инжекции РЭП, соединены специальные электроды 4, 5. Участки электродов 4–8 образуют вакуумные передающую линию и бесфольговый диод. Выходные импульсы напряжения индукторов, входящих в систему инжекции, суммируются с помощью передающей линии и концентрируются между катодом и анодом вакуумного диода. В полости, образованной электродами 5 и 6, расположен соленоид 9. При прохождении по его обмотке импульсного тока он генерирует импульсное продольное магнитное поле с индукцией до 0,6 Тл. Все это позволяет создать взрывную электронную эмиссию на катоде и сформировать РЭП. Более подробно процессы в таком диоде описаны в [1, 2]. Для этого диода были разработаны особые инжекторные блоки индукторов 10. Апертуры их ускорительных трубок и наружные диаметры корпусов превышают аналогичные параметры соответствующих узлов ускорительных блоков 11, созданных для ускоряющей системы установки ЛИУ-30. В процессе экспериментов некоторые ускорительные блоки, ранее относящиеся к ускоряющей системе, с помощью общего катода были объединены с систе-

мой инжекции. В частности, на рис. 1 показано два таких блока. Сформированный РЭП ускоряется при прохождении через ускоряющие зазоры ускорительных блоков, образованные специальными электродами 12, 13 (ниже они называются трубами дрейфа). Эти трубы дрейфа выполнены полыми и установлены в ускорительных трубках ускорительных блоков индукторов. В ускоряющих зазорах концентрируются выходные импульсы напряжения каждой пары индукторов ускорительных блоков. В полостях труб дрейфа размещены соленоиды, генерирующие при прохождении по их обмоткам импульсных токов импульсное продольное магнитное поле с индукцией до 0,6 Тл. По завершении ускорения РЭП распространяется в тракте транспортировки до выходного узла. Тракт транспортировки РЭП образован набором секций 14, значительная часть которых унифицирована. Корпуса секций размещены последовательно друг за другом и герметично соединены между собой, а первый слева по рис. 1 из их торцов герметично соединен с ускорительной трубкой последнего блока индукторов. Вблизи последнего торца набора секций тракта транспортировки может быть установлен мишенный узел для преобразования энергии РЭП и формирования поля ТИ на выходе ускорителя ЛИУ-30. Сразу за этим узлом тракт транспортировки закрыт выходным окном. В каждой секции тракта транспортировки РЭП размещена типовая для ускорительных блоков индукторов труба дрейфа с соленоидом. Эти соленоиды при прохождении по их обмоткам импульсных токов генерируют импульсное продольное магнитное поле с индукцией 0,6 Тл. Предусмотрено, что рассмотренный выше мишенный узел может быть убран, а РЭП при этом через практически прозрачное для него выходное окно будет попадать из ускорительного тракта установки ЛИУ-30 в атмосферу. Кроме того, при отсутствии мишенного узла и выходного окна к тракту транспортировки может быть присоединено, как показано на рис. 1, фокусирующее устройство 15 с комбинацией магнитных катушек, специальными мишенным узлом 16 и выходным окном. Это позволяет осуществить радиальное сжатие пучка электронов нарастающим вдоль оси магнитным полем.

В некоторых экспериментах не требуется получение высоких значений дозы и мощности дозы ТИ на выходе ускорителя ЛИУ-30. Установка дополнительного катода 17 позволяет увеличить с помощью отключения ресурс работы индукторов, размещенных левее места соединения держателя дополнительного катода с трубой дрейфа. При

этом все или некоторые из индукторов, расположенных правее, включаются. Кроме того, дополнительный катод необходим для режима формирования в одном включении ускорителя ЛИУ-30 двух выходных импульсов ТИ с варьируемым временным интервалом между ними [3].

Многомодульная структура снижает надежность функционирования и усложняет процессы управления и контроля работы многочисленных элементов во время включения установки ЛИУ-30. Вместе с тем, такая структура предоставляет возможность влиять на процесс ускорения пучка за счет изменения временной программы включения модулей, числа работающих модулей, амплитуды инжектируемого тока РЭП и других факторов. Это позволяет варьировать в широком диапазоне характеристики РЭП и ТИ, что значительно расширяет возможности ЛИУ-30 как облучательной установки. Так, граничная энергия ускоренных электронов уменьшается путем простого отключения от зарядки необходимого числа ускорительных модулей. На установке ЛИУ-30 зафиксированы режимы работы с различной граничной энергией электронов. Кроме того, экспериментально подобраны такие характеристики инжектируемого тока и программа включения модулей, при реализации которых в ускорительном тракте осуществляется постепенное укорочение длительности токового импульса за счет торможения электронов РЭП на фронте импульса тока под действием собственных электромагнитных полей [1].

Установка ЛИУ-30 при отсутствии существенного числа отказов способна создать на расстоянии 1 м от мишени дозу и мощность дозы ТИ 10^2 Гр и $5 \cdot 10^9$ Гр/с, соответственно. Максимальные выходные доза и мощность дозы ТИ, достигнутые вблизи выходного окна фокусирующего устройства ускорителя ЛИУ-30 составляют $\sim 2,4 \cdot 10^3$ Гр и $\sim 1,5 \cdot 10^{11}$ Гр/с, соответственно, в пятне площадью до 100 см^2 [1, 2, 4]. По совокупности этих выходных параметров ускоритель ЛИУ-30 является одним из самых мощных в мире источников коротких импульсов ТИ.

Таким образом, для получения близких к предельно возможным выходных доз и мощностей доз ТИ требуется, с одной стороны, обеспечить безотказное функционирование элементов и узлов установки ЛИУ-30. С другой стороны, для этого необходимо осуществить генерацию, ускорение, транспортировку и сжатие сильноточных РЭП. Это возможно при достаточно высоких уровнях электрических и магнитных полей в элементах и узлах установки ЛИУ-30, что уменьшает надеж-

ность их работы. В частности, одними из наиболее важных узлов ускорителя ЛИУ-30 являются блоки индукторов. Отказ отдельного индуктора и даже блока в целом не приводит, как правило, к значительному снижению выходных параметров, поэтому ускоритель ЛИУ-30 может до определенного предела эксплуатироваться с частью неисправных блоков. Однако при увеличении числа не работающих блоков индукторов сверх этого предела происходит заметное снижение выходных параметров ускорителя ЛИУ-30. Существенное число отказов ускорительных блоков индукторов было связано с электрическими пробоями водяной изоляции РЛ без разрядников. Это происходило преимущественно в местах локального уменьшения толщины водяной изоляции из-за выступания узлов соединения одного из электродов каждого разрядника с центральным дисковым электродом в соседнюю РЛ этого же индуктора. Электрические пробои инициировали возникновение гидроударов, приводивших к деформации электродов РЛ и разрушению части диэлектрических корпусов разрядников. После ремонта остаточная деформация электродов вызывала увеличение напряженности электрического поля в зазорах РЛ и повышала вероятность новых электрических пробоев.

Для повышения надежности работы ускорительных блоков установки ЛИУ-30 был выбран вариант их модернизации, в основу которого положено увеличение осевого размера каждого индуктора на $\sim 7\%$, что позволило увеличить толщину водяной изоляции в проблемных местах РЛ без разрядников примерно на 20% [5]. Так как характеристики первого (рабочего) импульса ускоряющего напряжения индуктора определяются главным образом конфигурацией РЛ без разрядников, то ее общая геометрия была сохранена. При этом общая толщина водяной изоляции РЛ с разрядниками увеличена на 14% .

Было признано целесообразным совместить с модернизацией ускорительных блоков массовую замену разрядников, магнитных соленоидов и полиэтиленовых изоляторов ускорительных трубок, выработавших к этому времени свой ресурс.

Модернизация всех ускорительных блоков индукторов установки ЛИУ-30 была завершена в 2013 г. При этом функционирование ускорителя ЛИУ-30 не прерывалось на длительное время, что стало возможным благодаря наличию запасных ускорительных блоков.

Каждый модернизированный ускорительный блок проходил предварительные испытания. Подтверждалась герметичность полостей индукторов

с водой, систем газораспределения и газовых объемов разрядников, установленных в РЛ, а также герметичность объемов ускорительных трубок. Кроме того, проверялось соответствие выходных электрических характеристик модернизированных ускорительных блоков аналогичным параметрам таких блоков до модернизации.

После модернизации амплитуда импульса индукции магнитного поля соленоидов выросла при тех же параметрах конденсаторной батареи. В связи с этим во всем ускорительном тракте установки ЛИУ-30 амплитуда индукции импульсного магнитного поля может быть увеличена при использовании существующей конденсаторной батареи. Это открывает возможность для повышения амплитуды тока РЭП и/или уменьшения утечек его электронов и попадания их на поверхность изоляторов ускорительных трубок и в ускоряющие зазоры с иницированием вторичной электронной эмиссии.

После модернизации всех ускорительных блоков установки ЛИУ-30, в 2014 и 2015 годах проводился анализ ее функционирования. В частности, за это время не произошло ни одного электрического пробоя водяной изоляции РЛ индукторов ускорительных блоков. Отсутствовали отказы со стороны полиэтиленовых изоляторов ускорительных трубок блоков индукторов и разрядников РЛ. Наблюдался лишь единичный отказ соленоида ускорительного блока, связанный с дефектом изготовления. Отношение суммы отказов модернизированных ускорительных блоков к среднему числу их включений за рассматриваемый период времени сократилось в десять раз по сравнению с аналогичным параметром за такой же период эксплуатации ускорительных блоков до модернизации. В основном модернизированные ускорительные блоки индукторов в плановом порядке выводились в ремонт в связи с необходимостью очистки электродов и изоляционных корпусов разрядников, установленных в РЛ индукторов, от нагара. Часть ремонтов была связана

с ликвидацией возникавшей негерметичности узлов системы газораспределения и газовых объемов разрядников, установленных в РЛ.

Таким образом, после модернизации всех ускорительных блоков индукторов установки ЛИУ-30 существенно повышена надежность ее функционирования в наиболее востребованных режимах с генерированием близких к предельно возможному выходных доз и мощностей доз ТИ.

Список литературы

1. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Герасимов А. И. и др. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 // ПТЭ. – 1998. – № 2. – с. 13–25.
2. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко В. А. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // Физика и техника высоких плотностей энергии: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – с.165–191.
3. V. S. Bossamykin, A. I. Gerasimov, V. S. Gordeev et. al. Operation of LIA-30 linear induction accelerator in the mode of generation of two bremsstrahlung pulses//11-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS-96, Prague, Czech Republic, June 10–14, 1996, pp. 640–643.
4. V. T. Punin, N. V. Zavyalov, V. F. Basmanov et. al. Generation of bremsstrahlung fields of higher than 10^{13} rad/s intensity in the mode of LIA-30 electron beam focusing//15-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS'2004, Saint-Peterburg, RF, July 18-23, 2004, pp. 155-157,
5. Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Горностай-Польский С. А. и др. Модернизация ускорительных блоков мощного линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-30//Проблемы физики высоких плотностей энергии. XII Харитоновские тематические научные чтения. Доклады 10–19 апреля 2010 г. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2010, с. 67–72.