

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИУ-30

RISE OF OPERATION STABILITY OF LINEAR INDUCTION ELECTRON ACCELERATOR LIU-30

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев, С. А. Горностай-Польский, А. А. Васюнин, В. П. Грицына, А. В. Жильцов, О. В. Зверев, В. В. Кульгавчук, М. Г. Балябин, Ю. И. Никоноров, А. А. Петров, Д. В. Репин, Б. И. Модель, Е. Н. Крылевский

N. V. Zavyalov, V. S. Gordeev, S. A. Gornostai-Pol'skii, A. A. Vasyunin, V. P. Gritsyna, A. V. Zhiltsov, O. V. Zverev, V. V. Kul'gavchuk, M. G. Balyabin, Yu. I. Nikonorov, A. A. Petrov, D. V. Repin, B. I. Model, E. N. Krylevskii

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF)

Для повышения стабильности генерации близких к предельно возможным доз тормозного излучения на выходе ускорителя электронов ЛИУ-30 завершена замена его системы инжекции. Это позволило уменьшить примерно вдвое среднеквадратичное отклонение значения экспозиционной дозы в контрольной точке на расстоянии 1 м от мишени ускорителя ЛИУ-30. Среднее за серию включений значение экспозиционной дозы в этой точке выросло примерно в два раза, несмотря на уменьшение числа блоков индукторов в составе ускорителя ЛИУ-30.

To raise stability of generating close to maximum permissible bremsstrahlung doses at the output of LIU-30 electron accelerator, a change of its injection system was finished. This allowed about a twice decrease of a mean-squared departure of exposure dose value at the reference point at a distance of 1 m from LIU-30 accelerator's target. An average (during a shot series) exposure dose value at this point increased about twice, notwithstanding a decrease of a number of inductors' units as a part of LIU-30 accelerator.

Ускоритель ЛИУ-30 [1, 2], введенный в эксплуатацию в 1988 г., является одним из наиболее мощных в мире источников импульсов тормозного излучения (ТИ) наносекундного диапазона длительности. Он способен создать на расстоянии 1 м от мишени дозу и мощность дозы ТИ 10^2 Гр и $5 \cdot 10^9$ Гр/с, соответственно. Общий вид ускорителя ЛИУ-30 представлен на рис. 1, а на рис. 2 приведена одна из рабочих конфигураций его ускорительного тракта. В нем при работе установки ЛИУ-30 поддерживается разрежение с давлением остаточных газов $\sim 10^{-2}$ Па.

В ускорительном тракте установки ЛИУ-30 длиной около 25 м можно выделить две основные части. В состав одной из них входят система инжекции релятивистского электронного пучка (РЭП) с импульсом тока амплитудой до 100 кА при длительности около 30 нс и система ускорения этого пучка до граничной энергии электронов ≤ 40 МэВ. Они выполнены в виде

многомодульной структуры с автономным питанием и управлением каждого модуля. Модуль состоит из одного блока с четырьмя индукторами на радиальных линиях (РЛ) с водяной изоляцией, имеющих общую ускорительную трубку и двух генераторов импульсных напряжений (ГИН), выполненных по схеме Аркадьева-Маркса. Всего в ускорительном тракте установки ЛИУ-30 может быть использовано до тридцати шести таких модулей. Изоляторы ускорительных трубок всех блоков индукторов размещены последовательно друг за другом и герметично состыкованы. В объемах, ограниченных этими изоляторами, установлены один специальный и до тридцати двух типовых соленоидов. Обмотки этих соленоидов расположены внутри тонкостенных металлических оболочек. При прохождении по обмоткам соленоидов импульсных токов генерируется импульсное продольное магнитное поле с индукцией до 0,6 Тл.

К другой части ускорительного тракта относится тракт транспортировки РЭП, образованный набором секций. Корпуса этих секций размещены последовательно друг за другом и герметично состыкованы между собой, а первый слева по рис. 2 из их торцов герметично соединен с ускорительной трубкой последнего блока индукторов. Вблизи другого торца этого тракта установлен мишенный узел для преобразования энергии РЭП и формирования поля ТИ на выходе ускорителя ЛИУ-30. Сразу за этим узлом тракт транспортировки герметично закрыт выходным окном. В одной, отличной от других, секции тракта транспортировки РЭП размещены специальные, а в других секциях – типовые соленоиды. Эти соленоиды при прохождении по их обмоткам импульсных токов генерируют импульсное продольное магнитное поле с индукцией до 0,6 Тл.



Рис. 1. Общий вид ускорителя ЛИУ-30

В каждом индукторе установки ЛИУ-30 есть две РЛ, образованные центральным дисковым высоковольтным 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 тригatronного типа, расположенными равномерно по азимуту, на выходе индуктора формируются импульсы напряжения чередующейся полярности. Рабочим является первый импульс напряжения. 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.

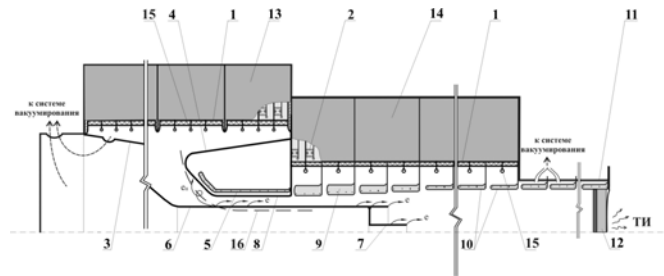


Рис. 2. Одна из рабочих конфигураций ускорительного тракта установки ЛИУ-30: 1 – ускорительная трубка; 2 – управляемый разрядник тригatronного типа; 3 и 4 – конусообразные держатели катода и анода, соответственно; 5 – анодный соленоид; 6 и 7 – цилиндрические участки катода; 8 – цилиндрический участок анода; 9, 10 – труба дрейфа с соленоидом; 11 – секция тракта транспортировки; 12 – мишенный узел; 13 – инжекторный блок индукторов; 14 – ускорительный блок индукторов; 15 – градиентные электроды изоляторов ускорительных трубок; 16 – одна из условных силовых линий магнитного поля; ТИ – тормозное излучение; e и e_n – условные обозначения основных и паразитных электронных потоков, соответственно

Для вакуумного бесфольгового диода системы инжекции ускорителя ЛИУ-30 были разработаны специальные инжекторные блоки индукторов. Размеры некоторых их элементов и узлов, в частности, апертуры ускорительных трубок и наружные диаметры корпусов превышают аналогичные параметры соответствующих элементов и узлов ускорительных блоков, созданных для ускоряющей системы установки ЛИУ-30. К первому слева (рис. 2) заземленному фланцу первого инжекторного блока прикреплено основание 3 конусообразного катододержателя, а к последнему заземленному фланцу последнего инжекторного блока – обечайка конусообразного держателя 4 цилиндрического анодного участка 8. Внутри образованной ими полости установлен соленоид 5, ниже называемый анодным. Основание катода, составленного из двух участков в виде последовательно соединенных цилиндрических тонкостенных труб 6, 7 разных диаметров, консольно закреплено на правом торце конусообразного катододержателя 3. Элементы держателей катода и анода и цилиндрические отрезки этих электродов, находящиеся в пределах ускорительных трубок инжекторных блоков, образуют участок вакуумной линии. Он позволяет осу-

шестить суммирование всех выходных импульсов напряжения инжекторных блоков индукторов. Результирующее импульсное напряжение с амплитудой около 4 МэВ прикладывается к промежутку между катодом и анодом вакуумного бесфольгового диода системы инжекции ускорителя ЛИУ-30. При этом электрическая напряженность на цилиндрической поверхности катода достаточна для возникновения взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ). Под действием электрического и магнитного полей из плазмы ВЭЭ на поверхности катода формируется РЭП.

В сериях первых экспериментов на ускорителе ЛИУ-30 участка катода 7 не было, а участок катода 6 не выходил за пределы ускорительной трубки последнего инжекторного блока. Полученный при этом РЭП инжектировался в ускоряющую систему. По мере прохождения им ускоряющих зазоров ускорительных блоков индукторов, входящих в состав ускоряющей системы, происходило наращивание энергии электронов. После прохождения ускоряющей системы РЭП распространялся в импульсном магнитном поле в вакуумном канале тракта транспортировки до мишенного узла 12.

С помощью системы инжекции на основе инжекторных блоков индукторов на ускорителе ЛИУ-30 выполнены серии уникальных экспериментов. Анализ полученных при этом данных позволил определить оптимальные диапазоны основных параметров РЭП на выходе системы инжекции. Кроме того, было отмечено развитие неустойчивостей в обозначенных как ϵ на рис. 2 потоках электронов сформированного РЭП, что не позволяло реализовать стабильное получение близких к предельно возможным выходных параметров ускорителя ЛИУ-30.

Неустойчивости РЭП приводили к потерям электронов при ускорении и транспортировке. Поскольку на отдельных участках поверхности анода и анодного держателя было зафиксировано энерговыделение, величина которого была значительно выше, чем на всей остальной поверхности, предположена возможность возникновения между локальными участками катода и анода электронных потоков. Ниже они называются паразитными и на рис. 2 условно обозначены как ϵ_n . Возникновению таких потоков способствовало отклонение от продольной оси ускорителя ЛИУ-30 к обечайке анода силовых линий импульсного магнитного поля, создаваемых краевыми витками обмотки анодного соленоида. Рассматриваемые силовые линии пересекали поверхность катода, напряженность электрического поля вблизи которой была достаточна для возникновения ВЭЭ. На рис. 2

часть одной из таких условных силовых линий изображена пунктирной кривой 16. Электроны из плазмы ВЭЭ могли двигаться к аноду вдоль силовых линий магнитного поля от показанного на рис. 2 места пересечения частью условной силовой линии 16 поверхности катода как влево (ϵ_n), так и вправо (ϵ). Паразитные электронные потоки вследствие нестабильности своих параметров негативно влияли на формируемый РЭП, повышая вероятность развития в нем разного рода неустойчивостей. Помимо этого, часть паразитных электронных потоков заполняла пространство между внешней границей РЭП и анодом, откуда могла быть вовлечена в ускоряющую систему. Это существенно уменьшало электрическую прочность некоторых ее элементов, находящихся вблизи выхода системы инжекции. Таким образом, паразитные электронные потоки отрицательно влияли и на стабильность работы ускоряющей системы установки ЛИУ-30.

Для уменьшения амплитуды тока паразитных электронных потоков и повышения стабильности работы ускорителя ЛИУ-30 с системой инжекции, в состав которой входили инжекторные блоки индукторов, предпринимались следующие меры. Во-первых, некоторые индукторы инжекторных блоков не заряжались, что приводило к снижению энергии инжектированных электронов и уменьшению амплитуды импульса тока РЭП. Во-вторых, увеличивались зазоры вдоль продольной оси между коническими участками катода и анода, что повышало индуктивность вакуумного диода и дополнительно снижало амплитуду тока РЭП. После всего этого среднеквадратичное отклонение дозы на расстоянии 1 м от мишени уменьшалось, но получение на выходе ускорителя ЛИУ-30 близких к предельно возможным доз и мощностей доз ТИ становилось практически невозможным.

Для увеличения энергии электронов и амплитуды импульса тока РЭП, формируемого системой инжекции с инжекторными блоками, цилиндрический участок катода удлинялся. Это позволяло объединить с инжекторными блоками часть ускорительных блоков индукторов, ранее относящихся к ускоряющей системе. Каждый из ускорительных блоков индукторов оснащен парой типовых полых тонкостенных цилиндрических труб дрейфа 9, 10. Они электрически связаны с крайними правыми (рис. 2) заземленными фланцами четных индукторов ускорительных блоков. Генерация выходных импульсов напряжения ускорительных блоков индукторов происходит аналогично вышеописанному процессу в инжекторных блоках. В ускорительных блоках вы-

ходные напряжения каждой пары индукторов суммируются и концентрируются в зазорах между соседними трубами дрейфа. Ниже эти зазоры названы ускоряющими. Внутри полостей труб дрейфа размещены типовые соленоиды. Такие же трубы дрейфа размещены и в секциях 11 транспортировочного тракта. Источником энергии для создания магнитного поля в ускорительном тракте служит секционированная конденсаторная батарея с общим энергозапасом более 6 МДж.

На рис. 2 показано два ускорительных блока, объединенных общим катодом с инжекторными блоками индукторов. При этом результирующее импульсное напряжение с амплитудой около 4 МэВ всех включенных инжекторных блоков суммируется с выходным импульсным напряжением порядка 1 МВ каждого из двух ускорительных блоков в режиме бегущей волны в вакуумной коаксиальной линии. Последняя образована катодом и относящимися к рассматриваемой паре ускорительных блоков трубами дрейфа, которые являются участками анода. Импульсы напряжения на выходах индукторов каждого инжекторного блока, начиная со второго, появляются с оптимизированной задержкой относительно возникновения импульсов напряжения на выходах индукторов предыдущего блока. С определенной задержкой относительно друг друга и последнего инжекторного блока включаются и все ускорительные блоки индукторов.

Несмотря на увеличение зазора между коническими участками катода и анода и повышение энергии электронов РЭП, сформированного в системе инжекции с двумя дополнительными ускорительными блоками индукторов, изменения выходных параметров ускорителя ЛИУ-30 от импульса к импульсу оставались весьма заметными. Это могло быть следствием описанного выше негативного влияния на РЭП паразитных электронных потоков, возникающих на участке системы инжекции с инжекторными блоками индукторов.

Для существенного уменьшения паразитных электронных потоков предложено оптимизировать систему инжекции ускорителя ЛИУ-30 следующим образом. Во-первых, использовать в ней только ускорительные блоки индукторов. Во-вторых, выполнить катод и катододержатель цилиндрическими, без конусообразных участков. В-третьих, разместить вдоль всей области системы инжекции типовые трубы дрейфа с солеоидами. Кроме того, перед первым ускорительным блоком индукторов системы инжекции расположить дополнительный соленоид в типовой трубе дрейфа для минимизации отклонения силовых линий магнитного поля от продольной оси в начале этой системы. В такой

системе инжекции силовые линии магнитного поля не будут пересекать поверхность катода, напряженность на которой достаточна для возникновения взрывной электронной эмиссии. Кроме того, максимально унифицируются конфигурации областей инжекции и ускорения РЭП. Это позволяет минимизировать на границе между ними действующие на РЭП возмущения. На рис. 3 представлена одна из исследованных конфигураций системы инжекции установки ЛИУ-30 на основе ускорительных блоков индукторов и трехступенчатого цилиндрического катода. На рис. 4 показан общий вид ускорителя ЛИУ-30 с системой инжекции на основе ускорительных блоков индукторов. В объеме, ограниченном апертурами труб дрейфа 4 ускорительных блоков индукторов, последовательно друг за другом соосно размещены тонкостенные цилиндрические участки катода 5, 6 и 7. Каждый из них объединяет по паре ускорительных блоков индукторов, два из которых ранее относились к системе инжекции, а четыре – к ускоряющей системе. Участок 5 катода консольно закреплен на устройстве юстировки 8. К свободному торцу участка 5 с помощью устройства юстировки (на рис. 3 не показано) консольно прикреплен торец участка 6 катода. В свою очередь, на его свободном торце с помощью устройства юстировки (на рис. 3 не показано) консольно зафиксирован торец участка 7 катода. Помимо этого, участки 5 и 6, а также 6 и 7 катода электрически соединены между собой. Участок 5 с помощью равномерно распределенных по азимуту проводящих полосок 9 электрически соединен с обечайкой дополнительного соленоида 10. Трубы дрейфа ускорительных блоков индукторов и цилиндрический катод образуют коаксиальную вакуумную линию.

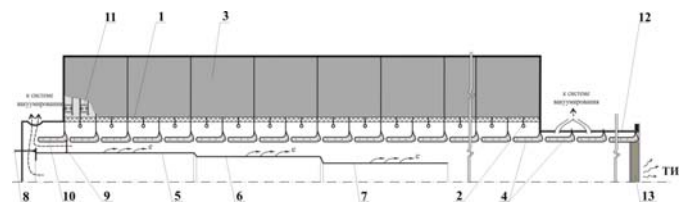


Рис. 3. Конфигурация системы инжекции установки ЛИУ-30 на основе ускорительных блоков индукторов: 1 – ускорительная трубка; 2 – градиентные электроды изоляторов ускорительных трубок; 3 – ускорительный блок индукторов; 4 – труба дрейфа с соленоидом; 5, 6, 7 – цилиндрические участки катода; 8 – устройство юстировки; 9 – проводящая полоса; 10 – дополнительный соленоид; 11 – управляемый разрядник тригatronного типа; 12 – секция тракта транспортировки РЭП; 13 – мишенный узел; е – условное обозначение основных электронных потоков; ТИ – тормозное излучение



Рис. 4. Общий вид ускорителя ЛИУ-30 с системой инжекции на основе ускорительных блоков индукторов

Выходные импульсы напряжения ускорительных блоков суммируются в этой линии в бегущей волне. Импульсы напряжения на выходах индукторов каждого блока, начиная со второго, появляются с задержкой относительно возникновения импульсов напряжения на выходах индукторов предыдущего.

На выходе системы инжекции контролировались амплитуда импульса тока РЭП, длительности его фронта, спада и на полувывоте, оценивался уровень однородности азимутального распределения заряда электронов. Эти величины были сопоставимы с теми, что обеспечивала система инжекции на основе инжекторных и ускорительных блоков индукторов во включениях ускорителя ЛИУ-30 с выходными параметрами, превышавшими средние значения.

Применение вышеописанной системы инжекции на основе ускорительных блоков индукторов

и трехступенчатого цилиндрического катода позволило почти в два раза уменьшить среднеквадратичное отклонение дозы в контрольной точке на расстоянии 1 м от мишени ускорителя ЛИУ-30 и, следовательно, значительно увеличить стабильность его работы.

Более того, среднее за серию включений ускорителя ЛИУ-30 значение экспозиционной дозы в контрольной точке на расстоянии 1 м от мишени выросло примерно в два раза и заметно приблизилось к предельно возможной величине. При этом ускоритель ЛИУ-30 работал без инжекторных блоков индукторов, а число ускорительных блоков индукторов не изменилось. В связи с изъятием инжекторных блоков число ускорительных блоков индукторов в ускоряющей системе может быть увеличено. Максимальное число блоков индукторов в ускорительном тракте установки ЛИУ-30 планируется оставить без изменения. Это позволяет рассчитывать на дополнительное увеличение выходных параметров ускорителя ЛИУ-30 без превышения ранее достигнутого наибольшего значения граничной энергии электронов РЭП.

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.