УДК 621.384.643

Повышение стабильности работы линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-30

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев,

С. А. Горностай-Польский,

А. А. Васюнин, 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

Для повышения стабильности генерации близких к предельно возможным доз тормозного излучения завершено оснащение линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-30 новой системой инжекции электронного пучка. В ее состав вошли шесть типовых ускорительных блоков индукторов, ранее относящихся к ускоряющей системе, и новый цилиндрический катод. Это позволило увеличить почти в два раза среднее значение экспозиционной дозы на расстоянии 1 м мишени ускорителя ЛИУ-30. а также уменьшить примерно вдвое среднеквадратичное отклонение. Выходные параметры могут быть повышены при оснащении ускоряющей системы дополнительными ускорительными блоками индукторов.

Введение

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 ТИ 10^2 Гр и мощность дозы ТИ $5\cdot10^9$ Гр/с. Общий вид ускорителя ЛИУ-30 показан на рис. 1, а на рис. 2 приведена схема одной 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 одну входят система инжекции релятивистского электронного пучка (РЭП) с импульсом тока амплитудой до 100 кА при длительности около 30 нс на половине высоты амплитуды, граничной энергией электронов ≤ 4 МэВ 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 возможно разместить 36 таких модулей. Изоляторы ускорительных

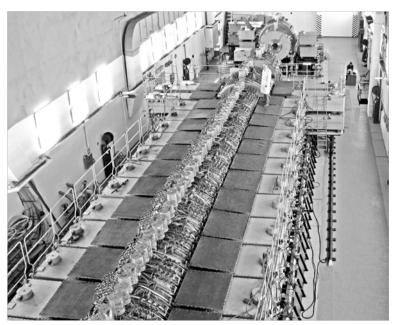


Рис. 1. Ускоритель ЛИУ-30

трубок всех блоков индукторов размещены последовательно друг за другом и герметично состыкованы. В объемах, ограниченных этими изоляторами, установлены один специальный и до 64 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 0,7 Тл.

К другой части ускорительного тракта относится тракт транспортировки РЭП, образованный набором секций, корпуса которых размещены последовательно друг за другом и герметично состыкованы между собой. На рис. 2 крайний левый торец тракта транспортировки РЭП герметично соединен с ускорительной трубкой последнего блока индукторов. Вблизи правого торца 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. Во всех секциях тракта транспортировки РЭП размещены типовые соленоиды. При прохождении по обмоткам соленоидов импульсных токов генерируется импульсное продольное магнитное поле с индукцией до 0,7 Тл.

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 5 тригатронного 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 2400 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.

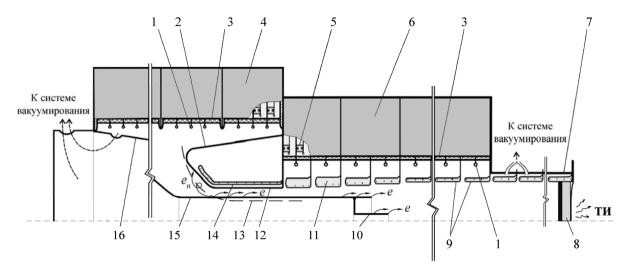


Рис. 2. Одна из рабочих конфигураций ускорительного тракта установки ЛИУ-30: 1 — градиентные электроды изоляторов ускорительных трубок; 2, 16 — конусообразные держатели катода и анода соответственно; 3 — ускорительная трубка; 4 — инжекторный блок индукторов; 5 — управляемый разрядник тригатронного типа; 6 — ускорительный блок индукторов; 7 — секция тракта транспортировки; 8 — мишенный узел; 9, 11 — труба дрейфа с соленоидом; 10, 15 — цилиндрические участки катода;

- 12 цилиндрический участок анода; 13 одна из условных силовых линий магнитного поля;
- 14 анодный соленоид; e и e_{π} основные и паразитные электронные потоки соответственно

Для вакуумного бесфольгового диода системы инжекции ускорителя ЛИУ-30 были разработаны специальные инжекторные блоки индукторов, размеры некоторых элементов и узлов которых, в частности апертура ускорительных трубок и наружный диаметр корпусов, превышают параметры тех же элементов и узлов ускорительных блоков в ускоряющей системе установки ЛИУ-30. К первому слева (см. рис. 2) заземленному фланцу первого инжекторного блока прикреплено основание 16 конусообразного катододержателя, а к последнему заземленному фланцу последнего инжекторного блока – обечайка конусообразного держателя 2 цилиндрического анодного участка 12. Внутри образованной ими полости установлен соленоид 14, ниже называемый анодным. Основание катода, составленного из двух участков в виде последовательно соединенных цилиндрических тонкостенных труб 10, 15 разных диаметров, консольно закреплено на правом торце конусообразного катододержателя 16. Элементы держателей катода и анода и цилиндрические отрезки этих электродов, находящиеся в пределах ускорительных трубок инжекторных блоков, образуют участок вакуумной линии, который позволяет осуществить суммирование всех выходных импульсов напряжения индукторов инжекторных блоков. Результирующее импульсное напряжение с амплитудой около 4 МВ 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 10 не было, а участок катода 15 не выходил за пределы ускорительной трубки последнего инжекторного блока. Полученный при этом РЭП инжектировался в ускоряющую систему. Каждый из ее ускорительных блоков индукторов оснащен парой типовых полых тонкостенных цилиндрических труб дрейфа 9, 11. Они

электрически связаны с крайними правыми (см. рис. 2) заземленными фланцами четных индукторов ускорительных блоков. Генерация выходных импульсов напряжения ускорительных блоков индукторов происходит аналогично описанному выше процессу в инжекторных блоках. В ускорительных блоках выходные 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 в секциях 7 транспортировочного тракта. Источником энергии для создания магнитного поля в ускорительном тракте служит секционированная конденсаторная батарея с общим энергозапасом более 6 МДж. По мере прохождения сформированным в системе инжекции РЭП ускоряющих зазоров ускорительных блоков индукторов нарастала энергия электронов. После прохождения ускоряющей системы РЭП распространялся в импульсном магнитном поле в вакуумном канале тракта транспортировки до мишенного узла 8.

С помощью системы инжекции на основе инжекторных блоков индукторов на ускорителе ЛИУ-30 выполнены серии уникальных экспериментов, результаты которых позволили определить оптимальные диапазоны основных параметров РЭП на входе ускоряющей системы. Кроме того, было отмечено развитие неустойчивостей в потоках электронов сформированного РЭП (см. рис. 2), вследствие чего не было реализовано стабильное получение близких к предельно возможным выходных параметров ускорителя ЛИУ-30. Неустойчивости РЭП приводили к потерям электронов при ускорении и транспортировке. На отдельных участках поверхности анода было зафиксировано значительное превышение удельного энерговыделения, наиболее вероятная причина которого возникновение между локальными участками катода и анода паразитных электронных потоков. В свою очередь возникновению паразитных потоков способствовало отклонение силовых линий импульсного магнитного поля, создаваемых краевыми витками обмотки анодного соленоида, от продольной оси ускорителя ЛИУ-30 к обечайке анода. Некоторые из рассматриваемых силовых линий пересекали поверхность катода, напряженность электрического поля вблизи которой была достаточна для возникновения ВЭЭ. На рис. 2 часть одной из таких условных силовых линий показана пунктирной кривой 13. Электроны из плазмы ВЭЭ могли двигаться вдоль силовых линий магнитного поля как влево (e_{π}), так и вправо (e) от места пересечения кривой 13 с поверхностью катода. Паразитные электронные потоки вследствие нестабильности своих параметров негативно влияли на формируемый РЭП, повышая вероятность развития в нем разного рода неустойчивостей. Кроме того, часть паразитных электронных потоков заполняла пространство между РЭП и анодом, откуда они могли быть вовлечены в ускоряющую систему, что существенно снижало 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 снижения амплитуды тока паразитных электронных потоков и повышения стабильности работы ускорителя ЛИУ-30 с системой инжекции, в состав которой входили инжекторные блоки индукторов, осуществляли следующие действия. Во-первых, некоторые индукторы инжекторных блоков не заряжали; это приводило к снижению энергии инжектированных электронов и уменьшению амплитуды импульса тока РЭП. Во-вторых, увеличивали зазоры вдоль продольной оси между коническими участками катода и анода; это повышало индуктивность вакуумного диода и дополнительно снижало амплитуду тока РЭП. В результате среднеквадратичное отклонение дозы на расстоянии 1 м от мишени уменьшалось, но получить на выходе ускорителя ЛИУ-30 близкие к предельно возможным дозы и мощность 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 позво-

ляло объединить с инжекторными блоками часть ускорительных блоков индукторов, ранее относившихся к ускоряющей системе. На рис. 2 показаны 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 соленоидами. 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 электрического поля на которой достаточна для возникновения взрывной электронной эмиссии. Кроме того, максимально унифицируются конфигурации областей инжекции и ускорения РЭП, что позволит минимизировать на границе между ними действующие на РЭП возмущения.

На рис. З показана одна из исследованных конфигураций системы инжекции установки ЛИУ-30 на основе шести ускорительных блоков индукторов и трехступенчатого цилиндрического катода. В объеме, ограниченном апертурами труб дрейфа 6 ускорительных блоков индукторов, последовательно и соосно размещены тонкостенные цилиндрические участки катода 8, 9 и 10. Каждый из них объединяет по паре ускорительных блоков индукторов, два из которых ранее относились к системе инжекции, а четыре — к ускоряющей системе. Участок 10 катода консольно закреплен на устройстве юстировки 13. К свободному торцу участка 10 с помощью устройства юстировки (на рис. 3 не показано) консольно прикреплен торец участка 9 катода. В свою очередь на его свободном торце с помощью устройства юстировки консольно зафиксирован торец участка 8 катода. Участки 9 и 10, а также 8 и 9 катода электрически соединены между собой. Участок 10 с помощью равномерно распределенных по азимуту проводящих полосок 11 электрически соединен с обечай-кой дополнительного соленоида 12. Трубы дрейфа ускорительных блоков индукторов и цилиндрический катод образуют коаксиальную вакуумную линию.

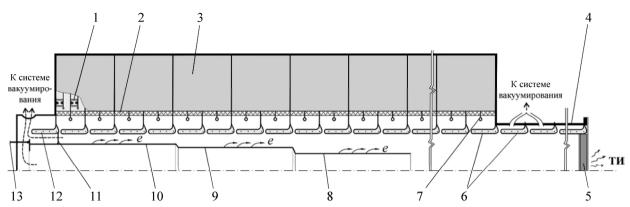


Рис. 3. Конфигурация системы инжекции установки ЛИУ-30 на основе шести ускорительных блоков индукторов: 1 — управляемый разрядник тригатронного типа; 2 — ускорительная трубка; 3 — ускорительный блок индукторов; 4 — секция тракта транспортировки РЭП; 5 — мишенный узел; 6 — труба дрейфа с соленоидом; 7 — градиентные электроды изоляторов ускорительных трубок; 8–10 — цилиндрические участки катода; 11 — проводящая полоса; 12 — дополнительный соленоид; 13 — устройство юстировки; e — основные электронные потоки

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 контролировали амплитуду импульса тока РЭП, длительности его фронта, спада и на полувысоте, оценивали уровень однородности азимутального распределения заряда электронов. Эти характеристики были сопоставимы с теми, которые 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 средне-квадратичное отклонение дозы в контрольной точке на расстоянии 1 м от мишени ускорителя ЛИУ-30 и, следовательно, значительно увеличить стабильность его работы (рис. 4). 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 возможному. 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.



Рис. 4. Ускоритель ЛИУ-30 с системой инжекции на основе ускорительных блоков индукторов

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 // Приборы и техника эксперимента. 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. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С. 165–191.

Rise of Operation Stability of Linear Induction Electron Accelerator LIU-30

N. V. Zavyalov, V. S. Gordeev, S. A. Gornostai-Pol'skii, A. A. Vasyunin, A. V. Zhil'tsov, 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

To raise stability of generating close to maximum permissible bremsstrahlung doses, equipping of LIU-30 accelerator by the new injection system was finished. It involved six standard accelerating units of inductors, earlier entering the accelerating system, and a new cylindrical cathode. This allowed not only lowering of parasitic electron current rates, but also diminishing about twice of a standard deviation of the exposure dose value at a distance 1 m from the LIU-30 accelerator's target. Its outer parameters can be improved when equipping the accelerating system by additional accelerating inductor units.