РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 2 794 513 (13) C1

(51) МПК
H05H 7/18 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H05H 7/18 (2023.01)

(21)(22) Заявка: **2022100050, 10.01.2022**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.01.2022

Дата регистрации:
19.04.2023

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **10.01.2022**

(45) Опубликовано: **19.04.2023** Бюл. № **11**

Адрес для переписки:
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Служба главного ученого секретаря, патентный отдел

(72) Автор(ы):
Селезнев Дмитрий Николаевич (RU), Ситников Алексей Леонидович (RU), Кулевой Тимур Вячеславович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2263376 C1, 27.10.2005. RU 2297687 C1, 20.04.2007. SU 588887 A, 07.11.1979. US 6777893 B1, 17.08.2004. US 2004212331 A1, 28.10.2004.**

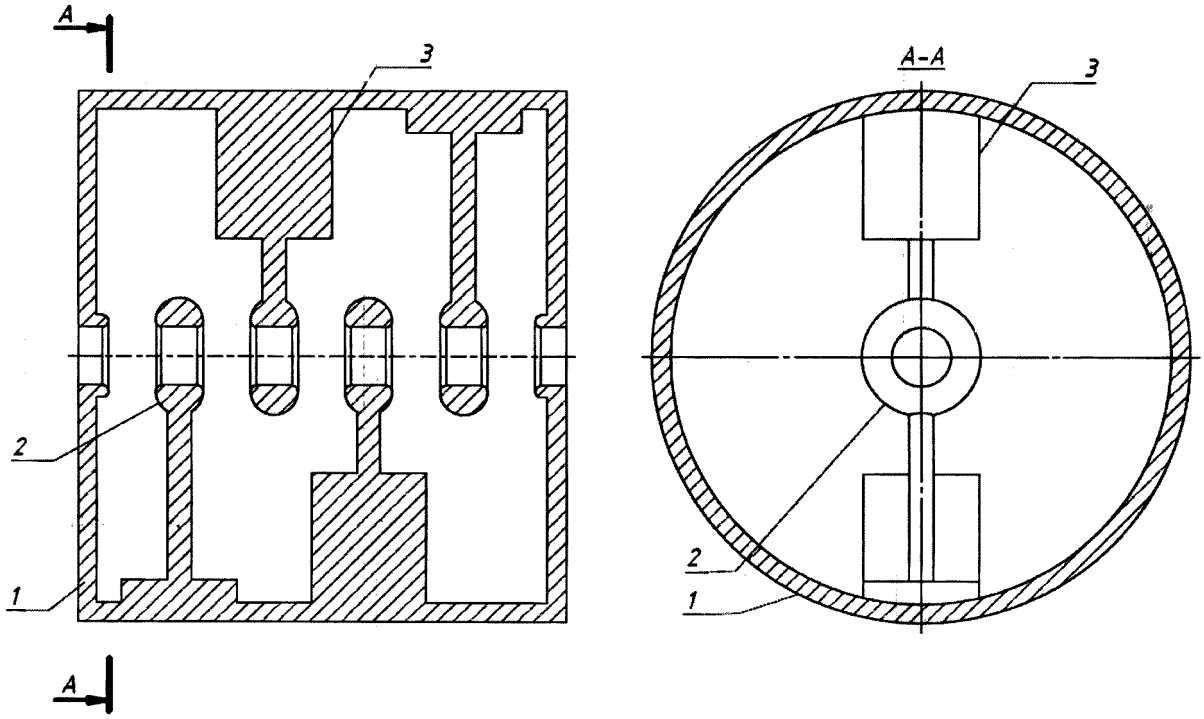
(54) УСКОРЯЮЩИЙ МОДУЛЬ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ С ОПОРАМИ ТРУБОК ДРЕЙФА УВЕЛИЧЕННОГО ДИАМЕТРА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области создания линейных ускорителей заряженных частиц. Технический результат - упрощение настройки распределения ускоряющего поля модуля разработанной ускоряющей структуры без существенного снижения энергоэффективности. Конструкция модуля представляет собой корпус цилиндрической формы, выполненный из материалов, характеризующихся сильной электропроводностью. Внутри корпуса резонатора размещены трубки дрейфа с использованием системы прямых опор трубок дрейфа без изменения угла установки опор, при этом опоры трубок дрейфа имеют увеличенный диаметр и цилиндрическую форму. 2 з.п. ф-лы, 5 ил., 1 табл.

RU 2794513 C1

RU 2794513 C1



(А) (Б)

Рис. 4

RU 2794513 C1

RU 2794513 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 794 513** (13) **C1**

(51) Int. Cl.
H05H 7/18 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
H05H 7/18 (2023.01)

(21)(22) Application: **2022100050, 10.01.2022**

(24) Effective date for property rights:
10.01.2022

Registration date:
19.04.2023

Priority:
(22) Date of filing: **10.01.2022**

(45) Date of publication: **19.04.2023** Bull. № **11**

Mail address:
123182, Moskva, pl. Akademika Kurchatova, 1, FGBU "Natsionalnyj issledovatelskij tsentr "Kurchatovskij institut", Sluzhba glavnogo uchenogo sekretarya, patentnyj otdel

(72) Inventor(s):
Seleznev Dmitrij Nikolaevich (RU),
Sitnikov Aleksej Leonidovich (RU),
Kulevoj Timur Vyacheslavovich (RU)

(73) Proprietor(s):
Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie "Natsionalnyj issledovatelskij tsentr "Kurchatovskij institut" (RU)

RU 2794513 C1

(54) ACCELERATING MODULE OF A LINEAR RESONANCE ACCELERATOR WITH INCREASED DIAMETER DRIFT TUBE SUPPORTS

(57) Abstract:

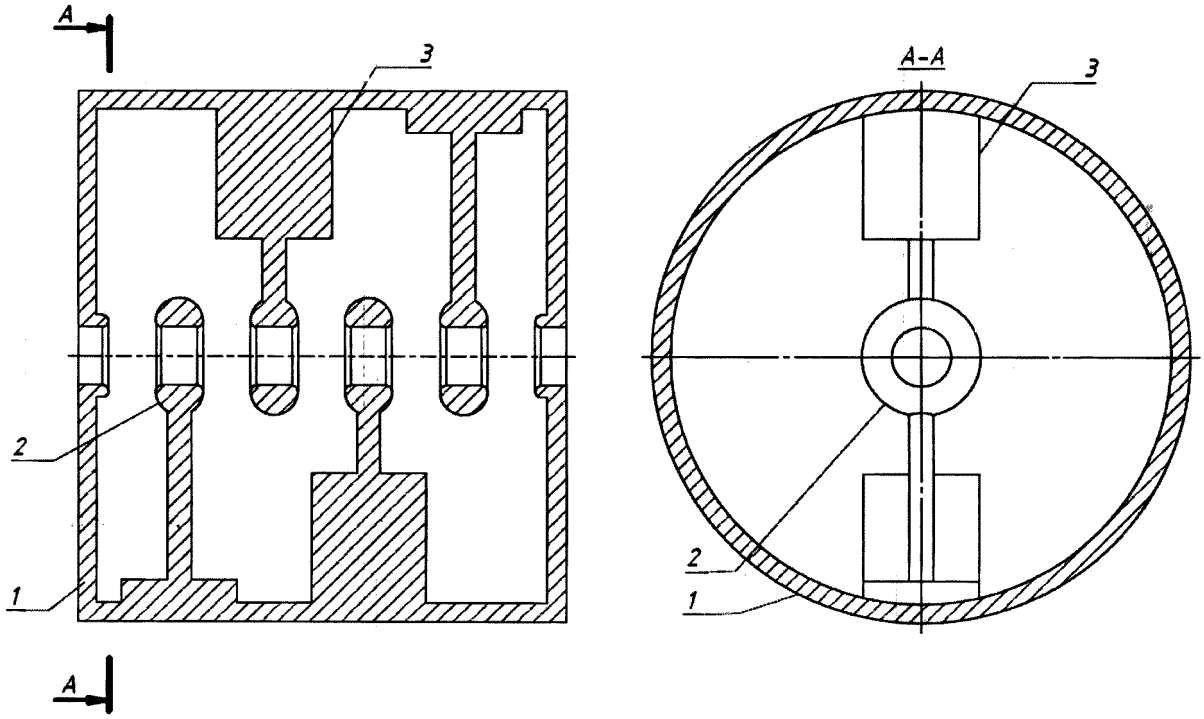
FIELD: linear accelerators.

SUBSTANCE: invention relates to the field of creation of linear accelerators of charged particles. The design of the module is a cylindrical body made of materials characterized by strong electrical conductivity. Drift tubes are placed inside the resonator housing using a system of direct drift tube supports without changing the angle of the supports, while the drift tube supports have an increased diameter and cylindrical shape.

EFFECT: simplification of setting up the distribution of the accelerating field of the module of the developed accelerating structure without a significant reduction in energy efficiency.

3 cl, 5 dwg, 1 tbl

RU 2794513 C1



(А) (Б)

Рис. 4

RU 2794513 C1

RU 2794513 C1

Изобретение относится к области создания линейных ускорителей заряженных частиц. Оно может быть использовано при разработке новых и модернизации уже существующих линейных ускорителей заряженных частиц.

Уровень техники

В качестве аналогов можно выбрать известные конструкции ускоряющих структур, например, описанные в докладе Kurennoy S., O'Hara J., Rybarcyk L, Compact Linac for Deuterons (Based on IH Structures with PMQ Focusing), LANL, Los Alamos, Proceedings of Hadron Beam 2008, Nashville, Tennessee, USA NM, High-Intensity Linacs & Rings: New Facilities and Concepts, WGE13, 2008, p. 428-430 [1], В предложенном докладе представлено сравнение параметров конструкций ускоряющих структур для резонансных ускорителей на стоячей волне на основе Н-резонаторов. Общим для всех конструкций является наличие цилиндрического корпуса, выполняющего роль высокочастотного экрана с размещенными внутри него трубками дрейфа, которые поддерживаются опорами. Опоры выполнены в виде цилиндров одного диаметра и с одной стороны крепятся к корпусу резонатора, а с другой поддерживают трубку дрейфа. Одним из близких аналогов является конструкция под названием «IH with vanes», изображенная на рис. 1. Как показано на рис. 1, к корпусу резонатора (1) поддерживающие трубки дрейфа (2) опоры (3) крепятся через проводящую подставку (4), выполненную в виде пилона - прямоугольной плиты, установленной вдоль продольной оси корпуса резонатора, при этом все опоры (3) одинаковы. Такая конструкция обладает наилучшими параметрами по энергоэффективности.

Недостатком такой конструкции является сложность настройки распределения ускоряющего поля, о которой говорится ниже.

Известна конструкция ускоряющей структуры, изображенная на рис. 2 раскрытая в авторском свидетельстве SU 728684, опубл. 30.03.1984 [2], в которой часть опор (3) трубок дрейфа (2) крепится к корпусу резонатора (1), а часть к проводящей подставке (4), выполненной в виде пилона, такая конструкция позволяет уменьшить высокочастотные потери мощности, за счет увеличения площади поверхности, по которой протекают высокочастотные токи, и произвести настройку распределения ускоряющего поля, путем крепления дополнительной проводящей штанги (5). Штанга (5) представляет собой проводящий стержень, крепящийся с одной стороны к опоре трубки дрейфа, а с другой к боковой стенке корпуса резонатора.

Общим недостатком указанных выше аналогов настоящего изобретения является сложность настройки распределения ускоряющего поля, формируемого между трубками дрейфа. Настройка распределения ускоряющего поля осуществляется настройкой собственной частоты ячеек ускоряющей системы, т.к. резонатор с трубками дрейфа представляет собой систему связанных электромагнитным полем резонансных контуров (ячеек). Под ячейкой ускоряющей системы подразумевается область резонатора между плоскостями, перпендикулярными оси резонатора и проходящими через середины опор трубок дрейфа. Наличие единой проводящей подставки, выполненной в виде пилона, усложняет процесс настройки, поскольку настройку каждой ячейки ускоряющей системы необходимо производить индивидуально, а из-за того, что все ячейки охвачены общим единым продольным магнитным полем, создающим сильную магнитную связь между ячейками, достичь удовлетворительную настройку сложно из-за влияния ячеек друг на друга (т.е. из-за эффекта обратной связи). Вследствие этого, даже незначительная перестройка одной ячейки приводит к перестройке других. Хотя некоторое упрощение настройки ячеек и осуществляется установкой дополнительных штанг, но установка таких штанг в одном ряду опор трубок дрейфа не обеспечивает достаточный диапазон

настройки ячеек, т.к. противоположный ряд опор трубок дрейфа, крепящихся к проводящей подставке, выполненной в виде пилона, по-прежнему охвачен сильной магнитной связью из-за наличия общего пилона.

Наиболее близким аналогом (прототипом) предлагаемого изобретения является известная из авторского свидетельства SU 588887, опубл. 05.11.1979 [3], ускоряющая структура линейного ускорителя заряженных частиц, работающая на типе колебаний H и выполненная в виде цилиндрического резонатора (1) с системой прямых (3а) и угловых опор (3б), называемых в [3] штырями, на концах которых укреплены трубки дрейфа (2), схема которой приведена на рис. 3.

Преимуществом прототипа перед рассмотренными выше аналогами является существенное упрощение настройки требуемого распределения ускоряющего поля. В такой ускоряющей системе, опоры трубок дрейфа расположены так, что проекции опор каждых двух соседних трубок, кроме первых двух, на плоскость, перпендикулярную оси резонатора, образуют углы, меньше 180°, причем с ростом расстояния между геометрическими центрами трубок дрейфа величина этих углов убывает.

Прототип, как и предложенное изобретение, имеет цилиндрический корпус резонатора с системой трубок дрейфа, поддерживаемых опорами.

Недостатком прототипа является то, что он обладает меньшей по сравнению с другими конструкциями [1, 2] энергоэффективностью. Это вероятно обусловлено тем, что в конструкции прототипа использовано крепление опор к корпусу резонатора непосредственно и без использования каких-либо пилонов.

Раскрытие сущности изобретения

Техническая проблема

К ускорителям, используемым в прикладных целях, и в частности, к ускоряющим структурам, предъявляется ряд специфических требований, более близких к производственным. В первую очередь: простота в обслуживании, экономичность, надежность. Особенно эти требования важны в случае, когда ускоряющая структура линейного ускорителя строится по модульной схеме, т.е. ускоряющая структура состоит из последовательности отдельных резонаторов (модулей). В этом случае конструкцию каждого модуля ускоряющей структуры необходимо унифицировать. Причем техническая проблема заключается в отсутствии такого унифицированного модуля ускоряющей структуры, конструкция которого позволит снизить время на настройку распределения ускоряющего поля модуля и существенно не снизить его энергоэффективность.

Решение этой проблемы заключается в создании конструкции модуля ускоряющей структуры, позволяющей совместить условия простоты настройки распределения ускоряющего поля в нем без значительного уменьшения его энергоэффективности.

В контексте предложенного изобретения под энергоэффективностью понимается общепринятое эффективное расходование энергии (см., например, http://ru.wikipedia.org/wiki/Энергоэффективность [4]), что для резонаторных ускоряющих структур может быть определено по величине шунтового сопротивления. Сравнение энергоэффективности резонаторных ускоряющих структур осуществляется по высокочастотной мощности P (актуальный порядок величины составляет сотни кВт), которую необходимо ввести в ускоряющую структуру, чтобы получить напряжение U (актуальный порядок величины составляет сотни кВ) между трубками дрейфа, требуемое для ускорения и приобретения заданной энергии частиц. Эта мощность определяется как:

$$P = \frac{U^2}{2R_ш},$$

где $R_Ш$ - шунтовое сопротивление, величина характеризующая эффективность ускоряющих структур (актуальный порядок величины составляет десятки Мом) [5]. Т.к. эта величина зависит от конструкции ускоряющей структуры, то по ней возможно провести сравнение энергоэффективности ускоряющих структур. Более высокое значение шунтового сопротивления при одинаковом для разных конструкций ускоряющих структур напряжении между трубками дрейфа означает более высокую энергоэффективность.

Настройку распределения ускоряющего поля предлагается проводить в каждом ускоряющем зазоре между трубками дрейфа без нарушения предварительно проведенной юстировки трубок дрейфа, что достигается изменением и перераспределением электрических потенциалов на трубках дрейфа уникальной конструкцией настроечного устройства, раскрытого в настоящем изобретении. Простота настройки обеспечивается конструкцией такого устройства. Одновременно, такое устройство не вносит ощутимое влияние на высокочастотные потери в резонаторе и подходит для надежной долговременной работы.

Как было сказано выше, настройка распределения ускоряющего поля осуществляется настройкой собственной частоты ячеек ускоряющей системы, т.к. $E_{0z}^2 \propto f$ [5], где E_{0z}^2 - продольная составляющая напряженности ускоряющего поля между трубками дрейфа, f - собственная частота ячейки ускоряющей системы, а относительное изменение собственной частоты ячейки ускоряющей системы $\Delta f / f \propto \Delta V$, где ΔV - изменение объема ячейки ускоряющей системы [5], то процесс настройки распределения ускоряющего поля вдоль резонатора сводится к процессу изменения объема каждой ячейки.

Технический результат

Технический результат предложенного изобретения состоит в значительном упрощении настройки распределения ускоряющего поля модуля разработанной ускоряющей структуры без существенного снижения энергоэффективности.

Технический результат достигается за счет предложенной конструкции модуля ускоряющей структуры, в которой применены опоры трубок дрейфа специальной конструкции, включающие в себя функцию специальных настроечных устройств и позволяющие за счет увеличения объема каждой из опор трубок дрейфа вдоль их длины обеспечить настройку распределения ускоряющего поля в каждом зазоре между трубками дрейфа. Увеличение объема цилиндрических опор трубок дрейфа за счет увеличения их боковой площади приводит к снижению поверхностного сопротивления R_s опор, что, в свою очередь, снижает высокочастотные потери dP_n, приходящиеся на элемент боковой поверхности dS, так как: $dP_n = 0.5 J^2 R_s dS$ [6], где, J - амплитуда поверхностного тока. Исходя из того, что $R_s \propto 1/D$, где D - внешний диаметр цилиндрических опор трубок дрейфа [7], т.е. обратно пропорционально диаметру D и, следовательно, чем меньше потерь, тем выше энергоэффективность.

Схема предложенного в настоящей заявке модуля ускоряющей структуры, представлена на рис. 4.

Предложенный модуль представляет собой изделие цилиндрической формы (корпус резонатора (1)), выполненное из материалов, характеризующихся сильной электропроводностью, например, меди, алюминия и т.п.

Схема предложенного в настоящей заявке модуля ускоряющей структуры, представлена на рис. 4 (А - вид спереди, Б - вид сбоку). Предложенный модуль представляет собой изделие цилиндрической формы, выполненное из материалов, характеризующихся сильной электропроводностью, например, меди, алюминия и т.п. Конструкция модуля ускоряющей структуры согласно настоящему изобретению состоит из корпуса резонатора (1) с размещенными в нем трубками дрейфа (2), которые поддерживаются опорами (3), выполненными в форме цилиндра с увеличенным диаметром, как показано на рис 4 (А, Б).

Внутри корпуса резонатора установлена система только прямых опор трубок дрейфа без использования размещения трубок дрейфа под углом (угловые опоры (3б) трубок дрейфа в прототипе на рис. 3), т.е. все трубки дрейфа в предложенном изобретении установлены только с использованием системы прямых опор. В предложенном изобретении опоры трубок дрейфа в отличие от прототипа имеют увеличенный диаметр, при этом увеличение зависит от конкретного распределения ускоряющего поля и может достигать четырех, пяти и более раз.

Высота цилиндрических опор трубок дрейфа подбирается исходя из конструктивных соображений при расчете настроечных устройств, как правило, она не выше H, определяемой по формуле H=R-r; где R - радиус корпуса резонатора; r - радиус трубки дрейфа. Настройка распределения ускоряющего поля происходит за счет изменения объема ячеек ускоряющей системы путем установки опор трубок дрейфа в форме цилиндра с увеличенным диаметром. Диаметр опор трубок дрейфа в форме цилиндра с увеличенным диаметром и их высота рассчитывается после нахождения величины изменения объема ячейки ускоряющей системы, которая зависит от конкретной частоты резонатора, распределения ускоряющего поля, диаметра, длины трубок и др. Связь изменения объема ячейки ускоряющей системы с изменением частоты резонатора определяется методом малых возмущений [5], численным моделированием с использованием программы CST-studio [8], широко используемой в области расчета резонаторов.

Ниже приводится расчетное соотношение изменения частоты при малых отклонениях параметров резонатора, происходящих в результате помещения в объем резонатора малого металлического тела. В контексте настоящего изобретения в качестве малого металлического тела, изменяющего внутренний объем резонатора, выступает опора трубки дрейфа в форме цилиндра с увеличенным диаметром. Форма таких опор выбрана цилиндрической, так как, во-первых; это упрощает процесс численного моделирования, и во-вторых; упрощает их изготовление.

Объем V этих опор определяется как $V=\pi D^2H/4$, где D и H - соответственно диаметр и высота опор трубок дрейфа в форме цилиндра с увеличенным диаметром.

Изменение частоты определяется как:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{4W}\left[\varepsilon_0 \int_V |E_0|^2 dv - \mu_0 \int_V |H_0|^2 dv\right], \text{ [5]}$$

где $\frac{\Delta f}{f_0}$ - относительное изменение частоты резонатора,

W - запасенная энергия в резонаторе,

ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума,

dv - дифференциал аргумента интегрирования,

E_0 - напряженность электрического поля до настройки резонатора,

H_0 - напряженность магнитного поля до настройки резонатора;

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума

V - объем опоры трубки дрейфа в форме цилиндра с увеличенным диаметром, посредством изменения которого происходит изменение объема резонатора.

Таким образом, согласно настоящему изобретению предложена ускоряющая система линейного резонансного ускорителя, выполненная в форме цилиндрического резонатора с системой встречных опор трубок дрейфа, на концах которых укреплены трубки дрейфа. При этом внутри корпуса резонатора установлена система прямых опор трубок дрейфа без изменения угла установки опор, а опоры трубок дрейфа выполнены в форме цилиндров с увеличенным диаметром.

Краткое описание чертежей

Рисунок 1. Ускоряющая структура «IH with vanes», описанная в [1], где:

1 - корпус резонатора;

2 - трубки дрейфа;

3 - опоры трубок дрейфа;

4 - проводящая подставка.

Рисунок 2. Ускоряющая структура с продольной плитой согласно [2], где:

1 - корпус резонатора;

2 - трубки дрейфа;

3 - опоры трубок дрейфа;

4 - проводящая подставка;

5 - дополнительная проводящая штанга.

Рисунок 3. Ускоряющая структура типа встречные штыри согласно [3], где:

1 - корпус резонатора;

2 - трубки дрейфа;

3 - опоры трубок дрейфа прямые (а) и угловые (б).

Рисунок 4 (А, Б). Модуль ускоряющей структуры согласно настоящему изобретению, где:

А - вид спереди,

Б - вид сбоку,

1 - корпус резонатора;

2 - трубки дрейфа;

3 - опоры трубок дрейфа, выполненные в виде цилиндра с увеличенным диаметром;

Рисунок 5. Зависимость относительного изменения напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре от изменения диаметра опоры трубки дрейфа в пятизазорном резонаторе.

Осуществление изобретения (примеры выполнения)

Пример 1. Сравнительный, демонстрирующий настройку распределения ускоряющего поля, осуществляемую согласно прототипу.

Настройка требуемого распределения ускоряющего поля в прототипе происходит за счет установки опор трубок дрейфа под углами меньше 180° на плоскости (например, как указано, от 0 до 180 градусов), перпендикулярной к оси резонатора. Требуемый угол установки определяется подбором, а уже более точная установка опоры определяется в процессе настройки ускоряющего поля. При этом очень важно не нарушить юстировку трубок дрейфа, если она будет нарушена, то потребуется очень трудоемкая процедура ее восстановления, поскольку точность юстировки трубок дрейфа современных ускорителей требуется не менее +/- 25 мкм. Установка опор под углом, перемещение их по корпусу резонатора и фиксация их в нужном положении все

это требует использования сложных приспособлений. Например, специально разработанных устройств, позволяющих одновременно осуществить перемещения по углу с шагом не более 1 градуса, юстировки в трех плоскостях трубок дрейфа с точностью не менее выше указанной, а также надежный электрический контакт с корпусом резонатора. Для изготовления таких приспособлений требуется использование высокоточных станков, а для их функционирования требуется еще и высокая точность изготовления корпуса резонатора, относительно геометрической оси, по которой должна производится настройка положения трубок дрейфа. С увеличением размеров корпуса резонатора степень точности линейных размеров падает. Так, согласно ГОСТ 25346-89 требуемый диаметр корпуса резонатора метрового диапазона длин волн составляет 300-500 мм. Параметры ускоряющего резонатора согласно прототипу: диаметр корпуса резонатора 420 мм; длина резонатора 434 мм; диаметр трубок дрейфа 100 мм; зазор между трубками дрейфа 46 мм; длина трубок дрейфа 46 мм; диаметр опор трубок дрейфа 20 мм; диаметр апертурного отверстия трубок дрейфа 50 мм; резонансная частота 162 МГц. В таком ускоряющем пятизазорном резонаторе с трубками дрейфа, установка двух опор диаметром 20 мм трубок дрейфа под углом 2,5 градуса каждая к нормали приводит к изменению напряженности электрического поля на 5% в ускоряющем зазоре, между данной трубкой дрейфа и предыдущей трубкой дрейфа, а допустимая погрешность настройки ускоряющего поля в современных ускорителях составляет не более 2%. Это накладывает повышенные требования к точности установки опор по углу с одновременным обеспечением точности пространственной юстировки, которую приходиться достигать, чтобы обеспечить работу ускорителя.

Пример 2. Использование конструкции ускоряющего модуля согласно предложенному изобретению, демонстрирующий упрощение настройки распределения ускоряющего поля и повышение показателей энергоэффективности по сравнению с прототипом.

Согласно предложенному изобретению, можно упростить процесс точной настройки распределения ускоряющего поля, если воспользоваться конструкцией модуля ускоряющей структуры, в котором используются специальные цилиндрические опоры трубок дрейфа, которые не требуется перемещать под углом по корпусу резонатора, достаточно только их установки на штатное место и в случае неудовлетворительного результата, надо будет заменить на опору с другим диаметром. Как было установлено, например, в ускоряющем пятизазорном резонаторе с трубками дрейфа. Параметры ускоряющего резонатора согласно изобретению: диаметр корпуса резонатора 450 мм; длина резонатора 420 мм; диаметр трубок дрейфа 100 мм; зазор между трубками дрейфа 46 мм; длина трубок дрейфа 50 мм; диаметр опор трубок дрейфа увеличенного диаметра 96 мм; диаметр апертурного отверстия трубок дрейфа 50 мм; резонансная частота 162 МГц. Изменение диаметра опоры трубки с 80 мм до 96 мм (на 16 мм) приводит к изменению напряженности электрического поля на 2% в ускоряющем зазоре, между данной трубкой дрейфа и предыдущей трубкой дрейфа, что видно из представленной на рис. 5 зависимости относительного изменения напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре от изменения диаметра опоры трубки. Энергоэффективность (шунтовое сопротивление $R_{ш}$) модуля ускоряющей структуры со специальными цилиндрическими опорами трубок дрейфа, согласно полученным результатам (см. Таблицу 1), выше на 20% в сравнении с прототипом, и ниже не более чем на 4% в сравнении, если использовать подставки-пилоны как в «IH with vanes» [1]. Расчет шунтовых сопротивлений производился программой CST-studio [8], широко используемой в области расчета параметров резонаторов.

Таблица 1. Сравнение энергоэффективности по шунтовому сопротивлению ($R_ш$)

Варианты модуля ускоряющей структуры	Шунтовое сопротивление ($R_ш$), МОм
Ускоряющая структура по изобретению	28,4
Ускоряющая структура по прототипу [3]	23,0
Ускоряющая структура «IH with vanes» согласно [1]	29,7

Таким образом, предложенное изобретение позволяет отказаться от сложного процесса установки опор трубок дрейфа на требуемый угол, как в прототипе [3], а использовать более простой и менее трудоемкий процесс подбора диаметров опор трубок дрейфа, сохраняя при этом требуемую энергоэффективность, превосходя показатели энергоэффективности прототипа и лишь незначительно уступая «IH with vanes» согласно [1], который характеризуется еще более сложной настройкой распределения ускоряющего поля, формируемого между трубками дрейфа, чем в [3]. Кроме того, исходя из полученных результатов исследований, представленных на рис. 5, требования к точности подбора диаметров опор трубок дрейфа не высоки, например, если нужно изменить, напряженность поля в ускоряющем зазоре на 2% достаточно изготовить диаметр опоры с точностью ±1 мм.

Литература

[1] доклад Kurennoy S., O'Hara J., Rybarcyk L, Compact Linac for Deuterons (Based on IH Structures with PMQ Focusing), LANL, Los Alamos, Proceedings of Hadron Beam 2008, Nashville, Tennessee, USA NM, High-Intensity Linacs & Rings: New Facilities and Concepts, WGE13, 2008, p. 428-430.

[2] авторское свидетельство SU 728684, опубл. 30.03.1984.

[3] авторское свидетельство SU 588887, опубл. 05.11.1979.

[4] Статья Википедии «Энергоэффективность», размещенная по адресу https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергоэффективность в редакции на 11.12.2021.

[5] Собенин Н.П., Милованов О.С., «Техника сверхвысоких частот» Энергоатомиздат, Москва 2007 г.

[6] «Радиоволноводы и объемные резонаторы» Ширман Я.Д., Связьиздат, Москва 1959 г.

[7] «Основы радиотехники» Амалицкий М.В., Связьиздат, Москва 1949 г.

[8] CST Studio Suite (https://www.3ds.com/ru/)

(57) Формула изобретения

1. Ускоряющая система линейного резонансного ускорителя, выполненная в форме цилиндрического резонатора с системой встречных опор трубок дрейфа, на концах которых укреплены трубки дрейфа, отличающаяся тем, что внутри корпуса резонатора установлена система прямых опор трубок дрейфа без изменения угла установки опор, при этом опоры трубок дрейфа выполнены в форме цилиндров, где диаметр указанной опоры выбирается в соответствии с формулой:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{4W}\left[\varepsilon_0 \int_V E_0^2 d\nu - \mu_0 \int_V H_0^2 d\nu\right],$$

где $\frac{\Delta f}{f_0}$ - относительное изменение частоты резонатора,

W - запасенная энергия в резонаторе,

ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума,

dν - дифференциал аргумента интегрирования,

E_0 - напряженность электрического поля до настройки резонатора,

H_0 - напряженность магнитного поля до настройки резонатора,

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума,

$V=\pi D^2 H/4$, где V - объем опоры трубки дрейфа в форме цилиндра, посредством изменения которого происходит изменение объема резонатора, D и H - соответственно диаметр и высота опор трубок дрейфа в форме цилиндра.

2. Ускоряющая система по п. 1, где опора трубки дрейфа представляет собой цилиндр с высотой не выше H, где H определяется по формуле:

H=R-r,

где R - радиус корпуса резонатора, r - радиус трубки дрейфа.

3. Ускоряющая система по любому из пп. 1, 2, где опора трубки дрейфа имеет диаметр 96 мм.

1

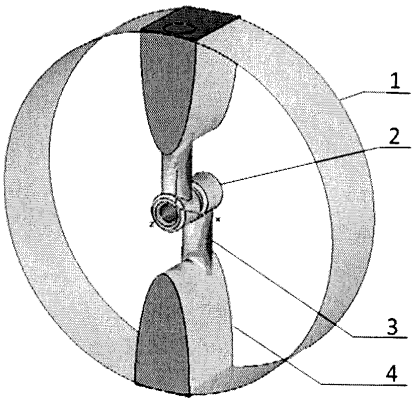


Рис. 1

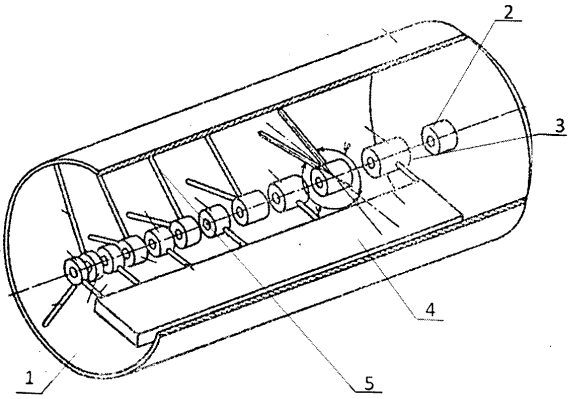


Рис. 2

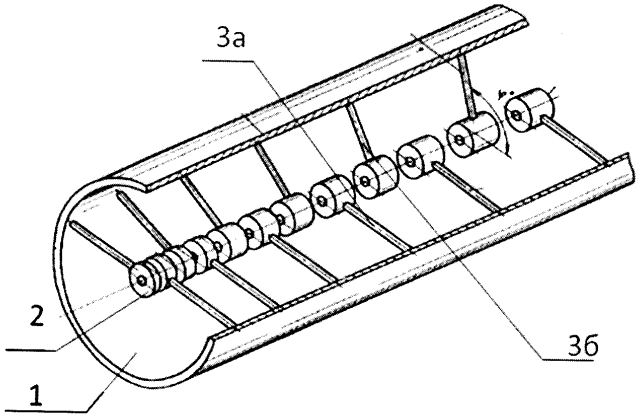
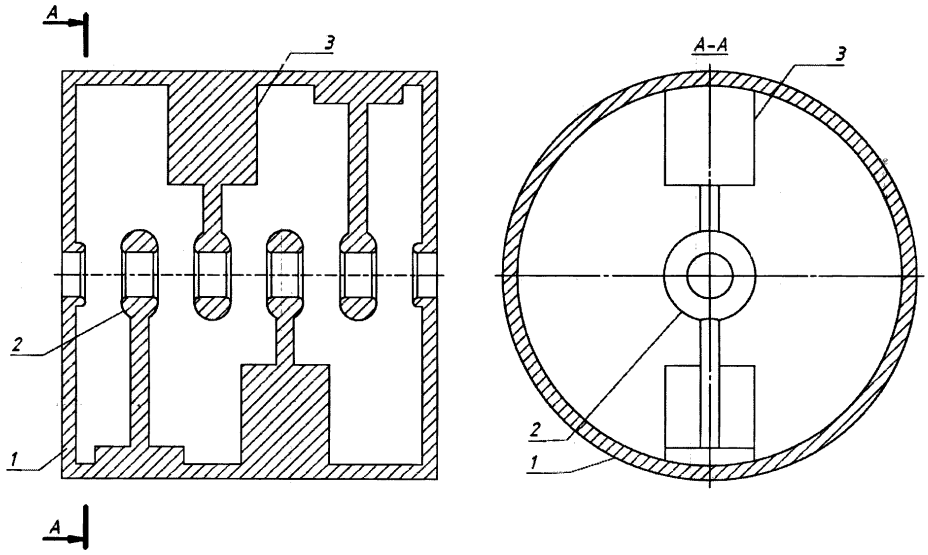


Рис. 3

2


A
3
2
1
A
A-A
3
2
1

(А) (Б)

Рис. 4

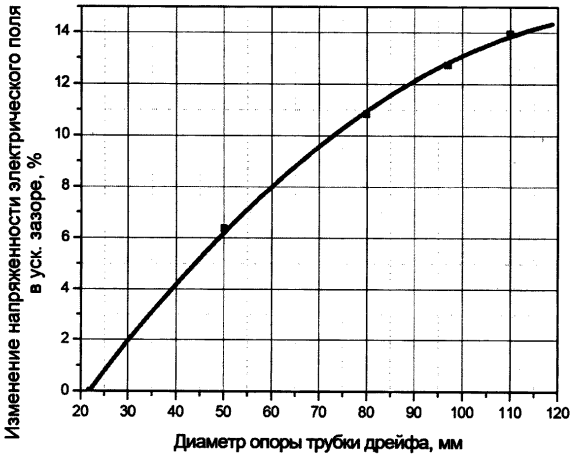

Изменение напряженности электрического поля в уск. зазоре, %
0
2
4
6
8
10
12
14
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Диаметр опоры трубки дрейфа, мм

Рис. 5