

УДК. 539.1:621.039

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД УСКОРЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, К. И. Сухачёв

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается расширение функциональных возможностей и области применения резонансного электромагнитного ускорителя. Проведено математическое моделирование резонансного электромагнитного ускорителя, работающего на индукционном принципе ускорения.

Резонансный ускоритель, немагнитные материалы, моделирование, расчёт скорости.

Введение

Электромагнитные ускорители катушечного типа, в том числе и резонансный электромагнитный ускоритель, имеют ряд ограничений, связанных с принципом их действия. Они взаимодействуют только с ферромагнитными материалами ускоряемого объекта. Взаимодействие с другими проводящими материалами будет, но сила взаимодействия ничтожно мала. Другим недостатком является ограничение мощности, приходящейся на одну ступень ускорителя. Магнитный отклик ускоряемого тела перестанет увеличиваться после насыщения материала, несмотря на рост напряжённости внешнего поля. Из этого следует, что для достижения большой кинетической энергии ускоряемого объекта необходимо делать ускоритель с несколькими разгонными ступенями. При этом увеличиваются сложность и габариты конструкции.

Индукционный разгон

Перечисленные недостатки можно преодолеть, если совместить метод резонансного переключения тяговых соленоидов и метод индукционного разгона. Такой тип ускорителя можно назвать индукционно-резонансным. Принципы взаимодействия резонансного электромагнитного ускорителя – РЭМУ и индукционного резонансного ускорителя – ИРУ отличаются. В первом ускорителе взаимодейст-

вие происходит между магнитным полем тягового соленоида и суммарным магнитным полем доменов вещества ускоряемого объекта. Во втором взаимодействуют макроток: ток индуктора (ранее тягового соленоида) и наведённый индукцией ток в ускоряемом объекте. Сила взаимодействия макротоков пропорциональна величине самих токов и ограничивается только физической возможностью материалов выдержать необходимую плотность тока. Поэтому ускоряемый объект и индуктор необходимо изготавливать из материалов с максимально высокой проводимостью.

Конструктивно ИРУ не отличается от РЭМУ (рис.1). На ускоряющем тракте соосно закреплены индукторы, связанные силовыми шинами с общим накопителем, который в колебательном режиме перезаряжается через индукторы последовательно с первого до последнего. Коммутация осуществляется мощными ключами (разрядниками или тиристорами) по сигналам системы управления, отрабатывающей задержки при включении индукторов. Величина задержек заранее рассчитана и зависит от материала, массы и формы ускоряемого объекта. Система управления должна иметь возможность автоматической корректировки величины задержек, установленных программой исходя из внешних факторов. Для их анализа необходимо иметь сеть сенсоров и датчиков: напряжения, температуры, тока,

скорости. Основным является датчик тока общей силовой шины, который позволяет определять момент прохождения током нулевого значения в процессе колебаний, поскольку именно состояние нулевого тока является оптимальным моментом для переключения или выключения индукторов. По показаниям этого же датчика можно аналитически определить напряжение накопителя, проводимость материала, температуру шин, период колебаний, добротность контуров, которые влияют на скорость объекта и, следовательно, на величину задержек в коммутационной таблице. Единственным конст-

руктивным отличием в описанных ускорителях является начальное положение ускоряемого объекта. Это связано с тем, что РЭМУ втягивает объект в центр катушки, а ИРУ выталкивает его. Таким образом, меняя начальное положение объекта и программу коммутации, можно один и тот же ускоритель применять для электромагнитного ускорения ферромагнитных частиц и для ускорения частиц из немагнитного проводящего материала. Система резонансного переключения в обоих случаях позволит максимально повышать эффективность ускорения.

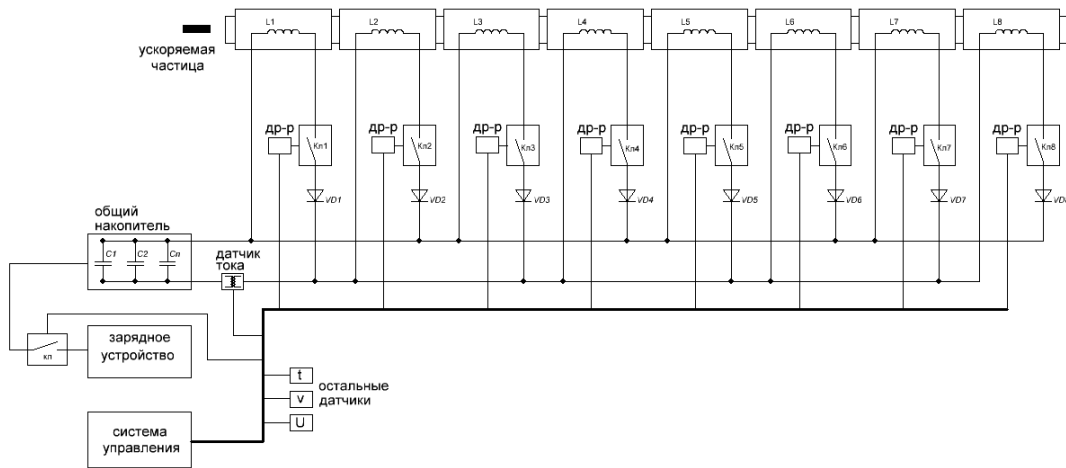


Рис.1. Схема РЭМУ и ИРУ

Моделирование

Рассмотрим области применения ИРУ. Для этого необходимо построить математическую модель, отражающую суть процессов, происходящих в ускорителе. После заряда накопителя до напряжения E в нулевой момент времени по сигналу системы управления происходит коммутация накопителя на первый индуктор. Электрические параметры согласованы так, чтобы характер начавшегося переходного процесса был колебательным. Тогда ток, возникший в индукторе, можно описать выражением:

$$i(t) = \frac{-E}{w_{ce} L} \exp(-dt) \sin(w_{ce} t), \quad (1)$$

где w_{ce} – угловая частота свободных колебаний, d – коэффициент затухания, L – индуктивность индуктора.

Следует заметить, что L является функцией от координаты частицы в индукторе, поскольку, проходя вдоль оси индуктора, частица будет оказывать влияние на индуктивность катушки. Ток, протекающий в индукторе, вызывает возникновение электромагнитного поля с индукцией B . Сила магнитной индукции B зависит от тока индуктора, меняющегося во времени, и от координаты, так как электромагнитное поле неоднородно в силу конечной длины индуктора:

$$B(x) = \frac{m_0 m i(t) n}{2} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} + \frac{(l-x)}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} \right) \quad (2)$$

где $i(t)$ – сила тока через тяговый соленоид, l – длина соленоида, r – радиус соленоида, n – количество витков соленоида, x – текущее положение центра массы частицы на оси соленоида относительно конца катушки, от которого началось ускорение частицы.

Электродвижущая сила индукции x равна скорости изменения магнитного потока Φ_B , который равен скалярному произведению вектора магнитной индукции и площади:

$$x = -\frac{d\Phi_B}{dt}; \quad (3)$$

$$\Phi_B = (B \times S) = BS \cos \alpha, \quad (4)$$

где α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости площади.

Индукционный ток в ускоряемом объекте находим по закону Ома:

$$i_{\text{инд}} = \frac{x}{r_{\text{нов}}}. \quad (5)$$

Сопротивление $r_{\text{нов}}$ рассчитывается как сопротивление поверхностного слоя ускоряемого объекта. Оно является функцией от температуры, так как в процессе ускорения объекта происходит нагрев материала, уменьшение его проводимости и сжатие поверхностного слоя.

Силу взаимодействия индуктора с объектом можно рассчитать из уравнения:

$$d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} dV, \quad (6)$$

где \vec{j} – плотность тока, dV – элемент объёма проводника с током, \vec{B} – индукция внешнего магнитного поля.

Систему уравнений (1–6) необходимо решать для каждого момента времени. Зная силу, действующую на объект и его массу, можно составить уравнение движения, решение которого и будет являться результатом модели одной ступени ИРУ. Для всех последующих ступеней полученная модель также справедлива и необходимо только корректировать входные параметры.

Из полученной модели следует, что ускоряться объект будет только при воз-

растании магнитного потока. Поэтому согласование необходимо обеспечить так, чтобы частица выходила из зоны действия индуктора за время четверти периода колебаний. Это условие обеспечивает разнонаправленность индукционного тока в объекте и тока индуктора (рис. 2).

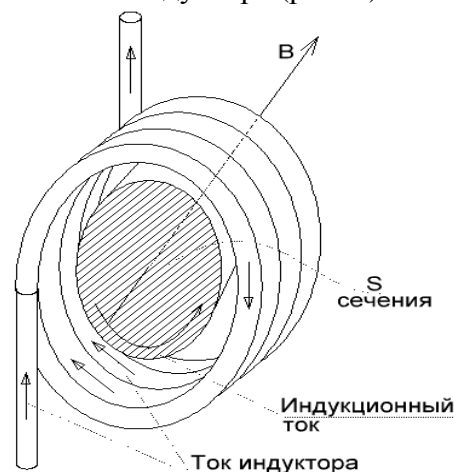


Рис.2. Направление токов

Из анализа модели следует, что индукционный резонансный ускоритель наиболее подходит для ускорения крупных частиц из немагнитного материала. При использовании ферромагнетиков возникнет сила взаимодействия, препятствующая разгону частицы. Размер частицы обусловлен необходимостью зарождения индукционного тока в объёме проводящего материала, и при недостаточной площади сечения этого не происходит. Форма сечения частицы для достижения максимальной эффективности должна как можно ближе соответствовать форме сечения ускоряющего тракта, что позволит увеличить магнитный поток. Так как плотность индукционного тока увеличивается с приближением к поверхности объекта, форму сечения целесообразно делать в виде окружности для уменьшения длины эквивалентного проводника, а следовательно, и для снижения электрического сопротивления.

Рассмотрим процесс ускорения в четырёхступенчатом индукционном резонансном ускорителе с энергией накопителя 200 КДж частиц из различного материала массой 4 грамма (рис. 3).

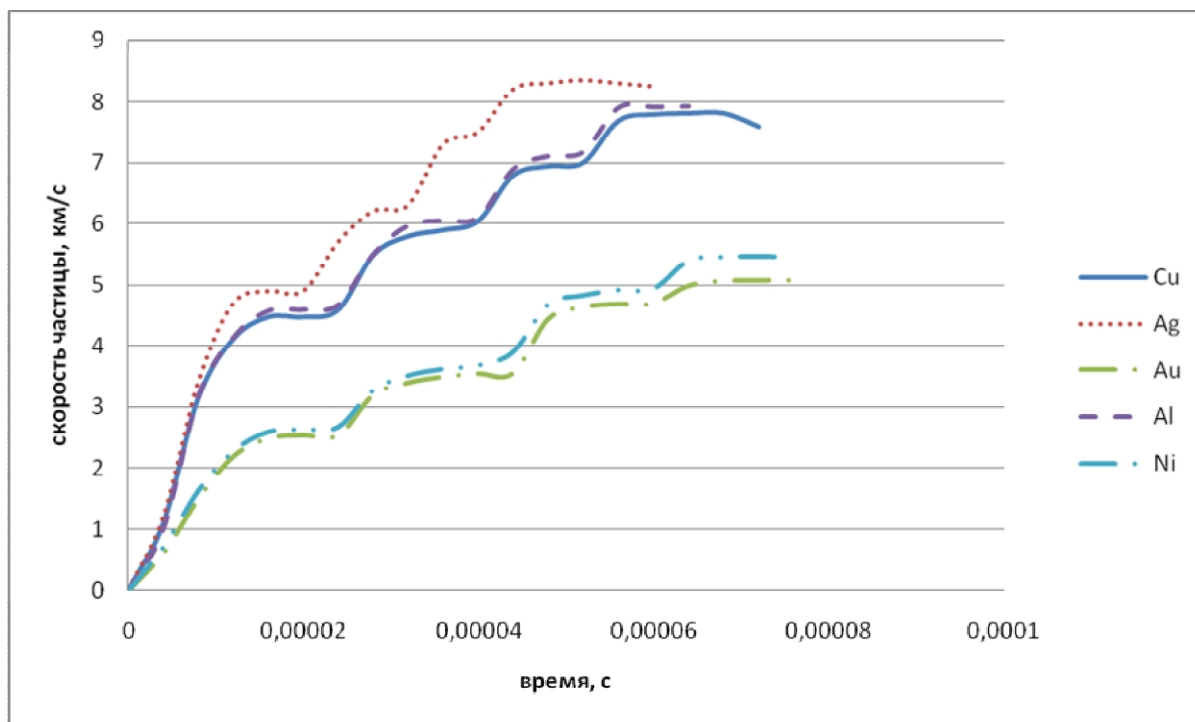


Рис. 3. Диаграмма скорости для различных материалов

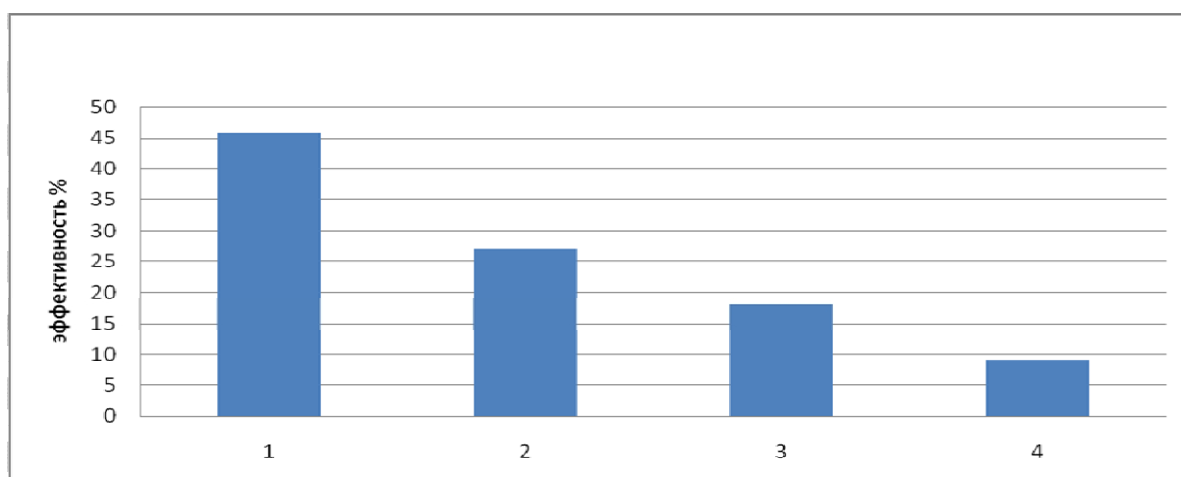


Рис. 4. Эффективность ступеней ускорения

Как видно из графиков, приведённых на рис. 3, на ступени ускорителя приходится разный прирост скорости. Последующие ступени обладают меньшей эффективностью, чем предыдущие, что связано с затратами энергии. Полезная составляющая затрат расходуется непосредственно на разгон частицы, а вредная составляющая складывается из потерь на омический нагрев токопроводящих элементов и потерь на электромагнитное излучение.

Распределение эффективности ступеней представлено на рис. 4.

Зависимости скорости, которые удастся достичь при одинаковых параметрах накопителя, от массы ускоряемой частицы приведены на рис. 5 для трёх материалов.

Зависимости скорости, которые удастся достичь при различных параметрах накопителя, от массы ускоряемой частицы, выполненной из алюминия, приведены на рис. 6 для различных энергий накопителя.

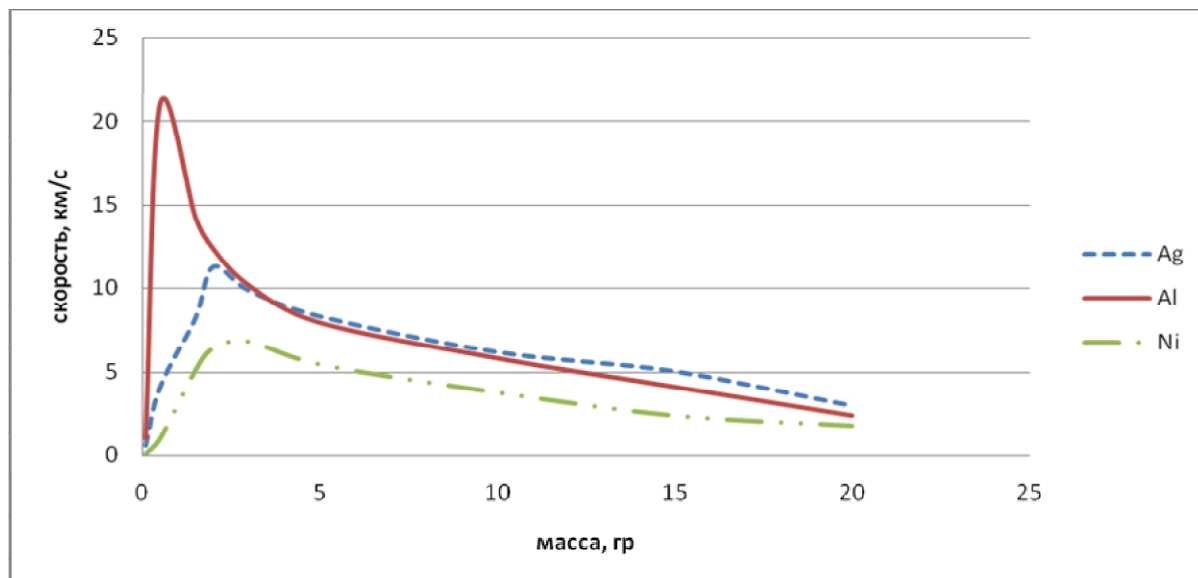


Рис. 5. Распределение скорости от массы для различных материалов

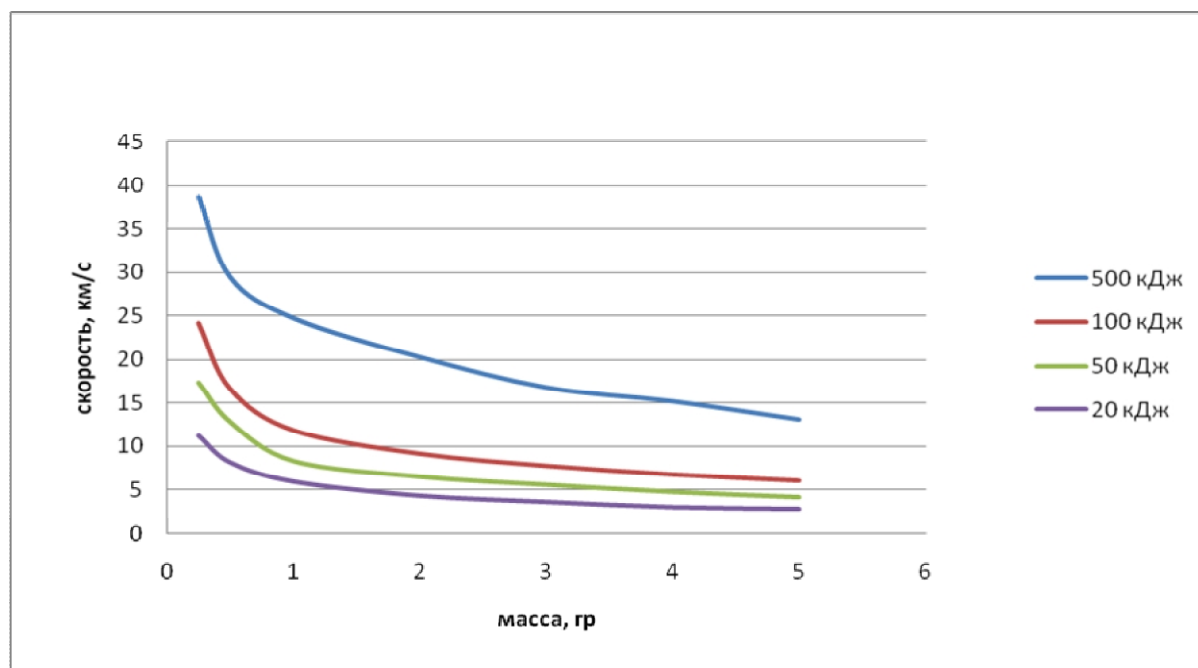


Рис. 6. Распределение скорости от массы для разных энергий накопителя

Заключение

Предложено расширение функциональных возможностей резонансного электромагнитного ускорителя, связанное с разгоном немагнитных материалов. Определены требования, необходимые для взаимодействия ускорителя с немагнитными частицами и не вносящие конструктивных изменений в РЭМУ, что позволяет легко переходить из одного режима в дру-

гой. Проведено математическое моделирование резонансного ускорителя, работающего на индукционном принципе ускорения, которое показало возможность ускорять немагнитные материалы до космических скоростей.

Работа выполнена при поддержке программы ФЦП «Кадры», контракт №П889.

Библиографический список

1. Пат. 2331033 С1 Российская Федерация. Многоступенчатый электромагнитный ускоритель с датчиком ускорения [Текст] / Васильев Е.В. Опубл. 10.08.2008, Бюл. №22.
2. Пат. 2324249 С1 Российская Федерация. Многоступенчатый ускоритель с бегущим переключением соленоидов [Текст] / Васильев Е.В. Опубл. 10.05.2008, Бюл. №13.
3. Алиев, И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию [Текст] / И.И. Алиев. – М.: «Высшая школа», 2000. – 255 с.
4. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я. Выгодский. – М.: АСТ, 2006. – С. 555-558.
5. Иродов, И.Е. Основные законы электромагнетизма [Текст] / И.Е. Иродов. – Изд. 2-ое, стереотип. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.

RESONANT METHOD OF ACCELERATING NON-MAGNETIC MATERIALS

© 2012 N. D. Syomkin, A. V. Piyakov, K. Ye. Voronov, K. I. Sukhachev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper is devoted to the extension of functional possibilities and the area of application of a resonant electromagnetic accelerator. Mathematical modeling of a resonant electromagnetic accelerator operating on the induction principle of acceleration is carried out.

Resonant accelerator, non-magnetic materials, modeling, velocity calculation.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара, космические исследования.

Пияков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: piyakov@ssau.ru. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара, космические исследования.

Воронов Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: voronov@ssau.ru. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара, космические исследования.

Сухачёв Кирилл Игоревич, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: физика ускорителей.

Syomkin Nicolay Danilovich, doctor of technical science, professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: motion control systems, physics of high-velocity impact, space research.

Piyakov Alexey Vladimirovich, candidate of technical science, associate professor, the department of radioelectronic equipment design and production, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: piyakov@ssau.ru. Area of research: motion control systems, physics of high-velocity impact.

Voronov Konstantin Yevgenyevich, candidate of technical science, associate professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University (National Research University). E-mail: voronov@ssau.ru. Area of research: motion control systems, physics of high-velocity impact, space research.

Sukhachev Kirill Igorevich, post-graduate student, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: physics of accelerators.