

## Импульсный ускоритель пылевых частиц

К.И. Сухачёв, Н.Д. Сёмкин, А.В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева  
443086, Российская Федерация, г. Самара  
Московское шоссе, 34

Рассматривается импульсный метод ускорения и условия реализации данного метода. Проведен анализ конструкции ускорителя, работающего на импульсном методе ускорения частиц. Проведено математическое моделирование работы одной ступени импульсного ускорителя. Исследованы возможные способы управления генератором импульсного напряжения на основе физической модели. Рассмотрены возможные улучшения характеристик импульсного ускорителя.

*Ключевые слова:* импульсный ускоритель, генератор импульсного напряжения, моделирование, расчет скорости.

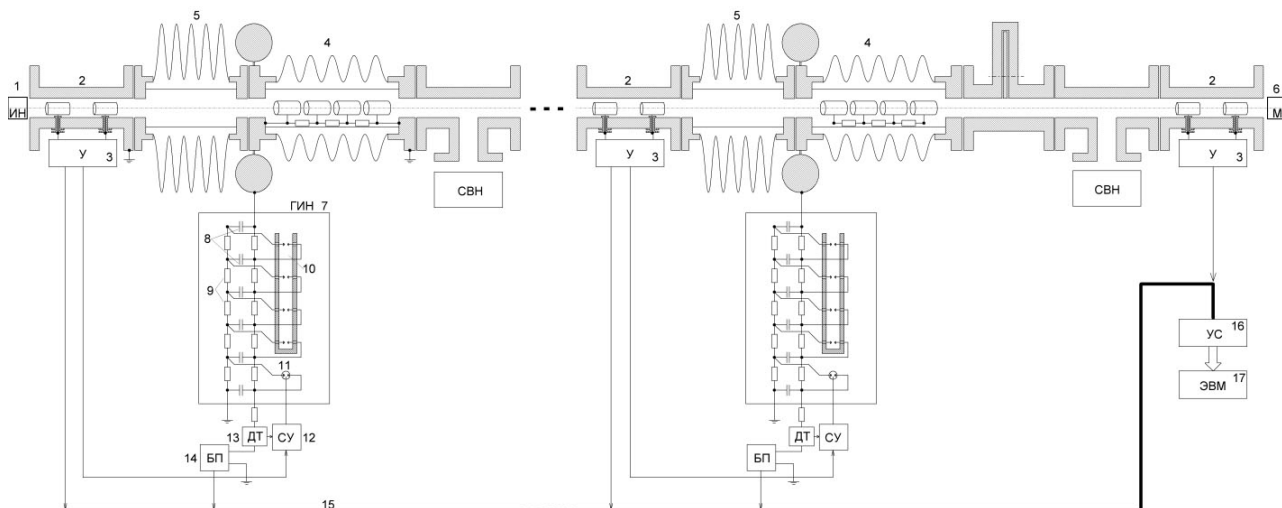
### Введение

Последнее время характеризуется созданием космических аппаратов с продолжительным сроком службы в условиях воздействия микрометеоритов и твердых частиц космического мусора, плотность потока которого неуклонно растет. В связи с этим актуальным становится задача исследования поведения материалов открытых элементов конструкции космического аппарата при столкновении с микрометеоритами и твердыми частицами космического мусора. Для моделирования таких процессов в наземных условиях используются установки, позволяющие разгонять как единичные, так и потоки частиц до космических скоростей. Как правило, это электростатические ускорители или электродинамические, реже используют комбинированные системы. Рассмотрим отдельно каждый из них.

В электростатическом ускорителе используется электростатическое поле, обычно создаваемое генератором Ван де Граафа, реже для получения высокого постоянного напряжения используется генератор Кокрофта-Уолтона. Известны конструкции, построенные на генераторе Ван де Граафа [1; 2] с максимальным ускоряющим напряжением в несколько МВ. Данный генератор работает на принципе механического разделения зарядов с помощью подвижной диэлектрической транспортной ленты, с которой заряд снимается верхним электродом и накапливается на шаре накопителя. Такой генератор достаточно громоздкий, так как требует создания больших вакуумных, или элегазовых камер, в которые

помещается весь генератор с системой ускоряющих электродов. Механическая составляющая является ненадежной частью ускорителя и требует постоянного обслуживания и контроля износа, как самой ленты, так и валов, направляющих роликов, съемных электродов, элементов привода. Нагрузочная способность небольших генераторов Ван де Граафа, которые используются в ускорителях, достаточна невелика, поэтому к поверхностям, которые находятся под потенциалом накопителя генератора, предъявляются строгие требования по чистоте, шероховатости, а так же все элементы должны иметь достаточно большие радиусы скругления. Перечисленные требования направлены на снижение токов утечек и, как следствие, повышение напряжения генератора и его КПД. Преимуществом электростатических ускорителей является: возможность ускорять широкий диапазон частиц, простота электрической части ускорителя и системы управления, возможность производить регулировку выходного напряжения в широких пределах, стабильность этого напряжения и, как следствие, высокая повторяемость экспериментов, поставленных на ускорителе данного типа.

Позднее развитие получили ускоряющие системы, в которых частица ускоряется, проходя много относительно низковольтных промежутков, так называемые линейные электродинамические ускорители. Известны следующие конструкции [3; 4]. В основе работы которых лежит принцип синхронной смены полярности напряжения на ускоряющих электродах с моментом



**Рис. 1.** Блок-схема импульсного ускорителя: 1 – инжектор частиц; 2 – индукционные датчики; 3 – усилитель сигнала с датчиков; 4 – линейный ускоритель (цилиндрические ускоряющие электроды); 5 – изолятор; 6 – мишень; 7 – генератор импульсного напряжения; 8 – емкости ГИН; 9 – разделительные сопротивления ГИН; 10 – камера с разрядниками; 11 – управляемый разрядник; 12 – система управления; 13 – датчик тока; 14 – блок питания; 15 – шина данных; 16 – согласующее устройство; 17 – ЭВМ

пролета частиц каждого из промежутков. Синхронизм обеспечивается либо увеличением размеров каждого следующего ускоряющего промежутка при постоянной частоте напряжения, либо увеличением частоты, при неизменных размерах промежутков. Второй вариант более рационален, так как позволяет существенно сократить размеры установки и увеличить диапазон ускоряемых частиц. К недостаткам данной топологии можно отнести сложную систему управления, которая в реальном времени по показаниям датчиков, должна сформировать управляющую пачку импульсов, обеспечивающую описанный выше синхронизм переключений, а так же сложную силовую часть, которая с частотой, заданной системой управления, производит перезаряд емкости ускоряющих электродов. Достоинством этого ускорителя является получение большого эффективного ускоряющего напряжения без применения громоздких высоковольтных генераторов Ван де Граафа.

## 1. Импульсный ускоритель

Импульсный ускоритель рис.1 состоит из нескольких независимых ступеней, каждая с собственной системой управления. Система ускоряющих электродов расположена в вакуумной камере и подключена к управляемому генератору импульсного напряжения. ГИН строится по принципу генератора Маркса на необходимое напряжение, ограничений в верхнем потолке почти не существует. Перед системой ускорительных электродов стоит датчик, который де-

тектирует влет частицы внутрь системы электродов. По сигналу датчика срабатывает система управления, запускающая разряд ГИН на емкость ускоряющих электродов.

Для реализации предложенного метода необходимо выполнить несколько условий:

- Обеспечить синхронный разряд ГИН с моментом пролета частиц центра первого ускоряющего электрода.
- Обеспечить минимальное время формирования высокого напряжения на электродах.
- Длительность импульса должна быть больше чем время пролета частицей системы ускоряющих электродов.
- Обобщенное время разряда емкости ускоряющих электродов и время зарядки накопителей ГИН должно быть меньше интервала между пролетами частиц.

Первое условие решается установкой датчика, например индукционного, перед системой электродов и подбором или расчетом времени задержки перед инициацией разряда ГИН. Время задержки является функцией всего одной величины – скорости влета частицы. Это и есть единственная задача системы управления. Соблюдение данного условия является одним из основных, так как в противном случае частица будет тормозиться полем первого электрода. Следующее условие обусловлено тем, что при затянутом времени формирования высокого напряжения – фронте импульса, частица успеет пролететь часть ускорительных промежутков, и ускорение будет осуществляться не макси-

мальным напряжением, а его частью, что снижает эффективность ускорителя. Третье условие связано с тем, что импульс напряжения имеет не прямоугольную форму, и если время пролета частицей системы электродов будет сопоставимо с длительностью импульса, напряжение успеет значительно снизиться, что опять же снизит эффективность ускорения, так как последние ускорительные промежутки не будут вносить вклад в ускорение частицы. Последнее условие продиктовано необходимой частотой пролета частиц. Дело в том, что в момент влета частицы в систему электродов напряжение на них должно быть минимально, в идеальном случае равно нулю, чтобы исключить эффект торможения, а ГИН полностью заряжен и готов к новому циклу. Если не обеспечить выполнение данного условия, частоту проведения испытаний придется снижать, что негативно скажется на характеристиках системы.

Кроме объявленных принципиальных условий, связанных с принципом работы ускорителя существует еще несколько инженерных проблем, которые тоже необходимо решить для реализации предложенного метода ускорения. Система управления должна обеспечивать стабильное и одновременное срабатывание всех ступеней ГИН в нужный момент времени, причем управление желательно организовать по первому разряднику, находящемуся под минимальным потенциалом, что существенно упростит конструкцию. Еще одной важной задачей является максимально возможное продление сроков работы разрядников без необходимости их обслуживания.

## 2. Моделирование электрических процессов

В данном разделе проведем моделирование электрических процессов в ускорителе. Для приближения модели к реальности все входные данные взяты с существующих деталей и элементов. Так модель резистивного ГИН построена на конденсаторах типа ИМ-100-0,15 УЗ, в качестве разделителей применены резисторы КЭВ-40, так же в модели учтены потери на ключах согласно данным о сопротивлении атмосферной дуги, потери в проводящих элементах конструкции, а так же возможные утечки, например на коронный разряд. ГИН состоит из 20 ступеней, с напряжением питания 80–100 кВ. Параметры системы ускорительных электродов были экспериментально измерены на системе линейного

электродинамического ускорителя [4], система электродов которого полностью подходит для применения в импульсном ускорителе. Она состоит из сорока ускорительных электродов, находящихся в вакууме и рассчитанных на напряжение 50 кВ каждый. Емкость данной сборки составила 320 пФ. Сопротивление одного элемента делителя 2,75 ГОм.

Построим упрощенные электрические схемы одного каскада ускорителя, для расчета переходных процессов, происходящих в процессе работы ускорителя, которые можно разделить на три стадии: процесс зарядки емкостей ГИН, стационарный режим и процесс формирования импульса высокого напряжения.

На рис. 2 представлены электрические схемы соответствующие двум стадиям работы импульсного ускорителя, где  $R_{\sigma}$  – балластное сопротивление источника питания ГИН;  $R_p$  – разделительные сопротивления ГИН;  $C_m$  – емкость накопителей ГИН;  $L_m$  – индуктивность монтажа одной ступени ГИН;  $R_{кл}$  – сопротивление коммутатора (дуги разрядника);  $R_{монт}, L_{монт}$  – сопротивление и индуктивность монтажа ускорителя;  $R_{ут}$  – сопротивление утечки с элементов конструкции ускорителя;  $R_{\partial}$  – сопротивление элемента делителя системы цилиндрических электродов ускорителя;  $C_{уск}$  – суммарная емкость цилиндрических электродов ускорителя.

Проведем анализ и оптимизацию схемы. Первым, как наиболее важным рассмотрим процесс формирования импульса высокого напряжения (рис. 2, б). Проведем упрощение схемы и введем новые обозначения. В процессе формирования импульса все емкости накопителей ГИН  $C_m$  оказываются соединенными последовательно через небольшое активное сопротивление коммутаторов  $R_{кл}$  и паразитную индуктивность монтажа  $L_m$ . Так же в последовательную цепочку оказываются соединенными разделительные сопротивления ГИН  $R_p$ . Все перечисленные параметры можно заменить эквивалентными суммарными величинами:

$$C_{сум} = \frac{C_m}{n}$$

– эквивалентная емкость ГИН при равенстве всех накопителей  $C_m$ , где  $n$  – число ступеней ГИН;

$$R_{сум} = \sum_{k=1}^n R_{кл}$$

– суммарное сопротивление коммутаторов ГИН;

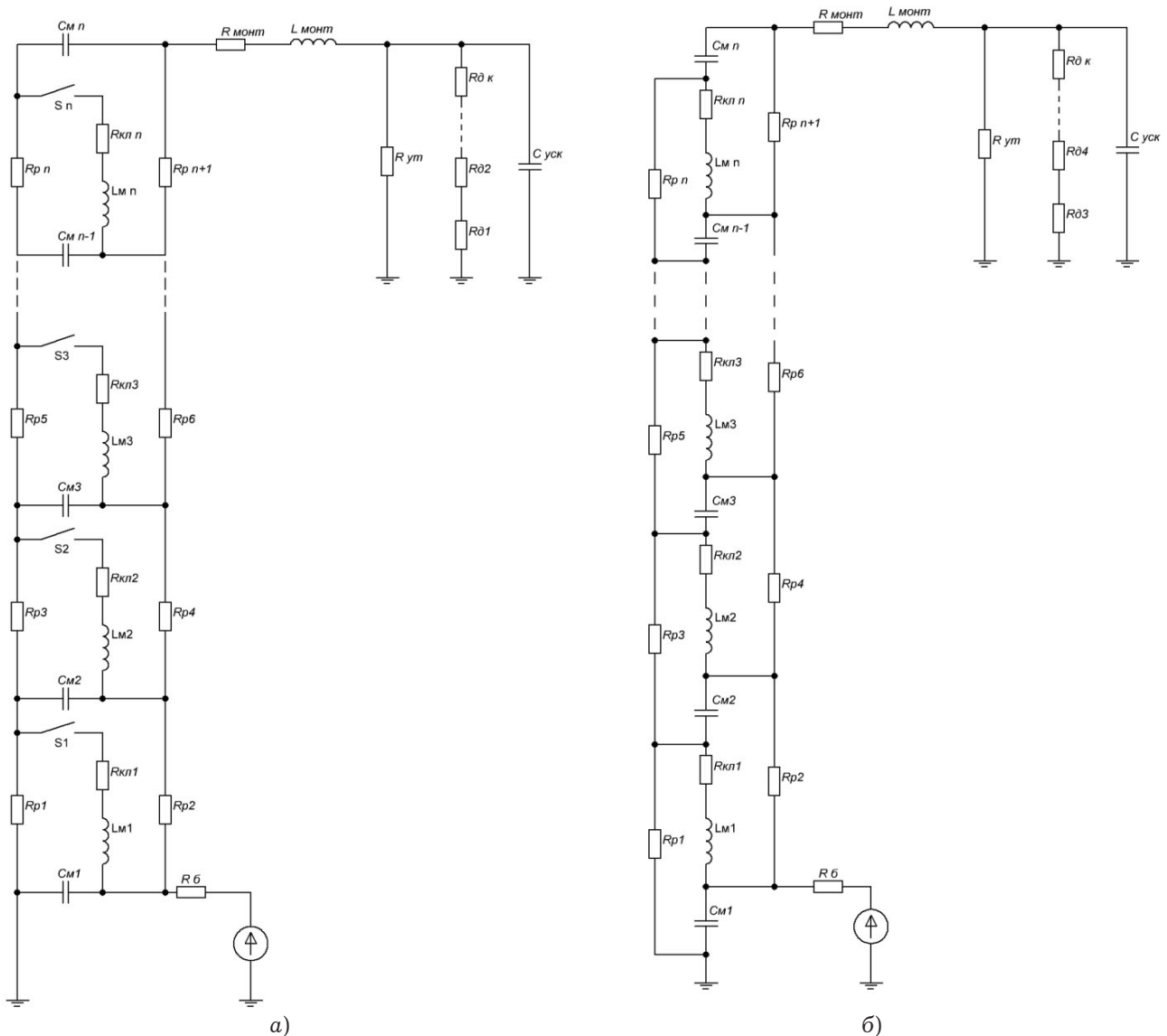


Рис. 2. Электрическая схема одного каскада импульсного ускорителя: а) стационарный режим; б) схема в момент формирования импульса

$$L_{сум} = \sum_{k=1}^n L_{mk}$$

– суммарное сопротивление монтажа всех ступеней ГИН;

$$R_{p_{г,м}} = \sum_{i=1}^{2k} R_{pi}$$

– суммарное сопротивление колонны разделительных сопротивлений  $R_p$ .

Следует заметить, что колонна разделительных сопротивлений  $R_{p_{сум}}$  в момент формирования импульса включена параллельно колонне накопителей ГИН и является паразитной нагрузкой, влияние которой необходимо по возможности уменьшать. Сопротивление утечки является второй составляющей частью паразитной нагрузки и включено параллельно системе ускоряющих

электродов и делителю, являющихся полезной нагрузкой ГИН. Тогда активное сопротивление параллельной цепи нагрузки, состоящей из сопротивления утечки  $R_{ym}$  и суммарного сопротивления делителя будет иметь вид:

$$R_{нагр} = \frac{R_{ym} \sum_{i=1}^m R_{di}}{\sum \left( R_{ym}; \sum_{i=1}^m R_{di} \right)}, \tag{1}$$

где  $m$  – количество ускоряющих промежутков в системе цилиндрических электродов линейного ускорителя. Индуктивности, входящие в состав схемы, являются паразитными параметрами и при реальном значении параметров вносят несущественное влияние на переходные процессы.

Ток, отдаваемый ГИН в нагрузку, будет равен:

$$I(t) = U_c(0)C_{сум} / [(R_{нагр}R_{монт}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{монт}R_{р_{сум}}C_{уск}C_{сум})(d_1 - d_2)] \times \times [(d_1R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{монт} + R_{нагр} + d_1R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}})e^{d_1t} - (d_2R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{монт} + R_{нагр} + d_2R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}})e^{d_2t}], \quad (2)$$

напряжение на ускоряющих электродах:

$$U(t) = U_c(0) + U_c(0)\{(d_2R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{монт} + R_{нагр} + d_2R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}}) \times (1 + d_2R_{сум}C_{сум})e^{d_2t} / [(d_1 - d_2)d_2] - (d_1R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{монт} + R_{нагр} + d_1R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}})(1 + d_1R_{сум}C_{сум}) \times e^{d_1t} / [(d_1 - d_2)d_1] - (R_{монт} + R_{нагр} + R_{р_{сум}}) / [d_1d_2]\} / (R_{нагр}R_{монт}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{монт}R_{р_{сум}}C_{уск}C_{сум}), \quad (3)$$

где

$$d_1 = [-(R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}} + R_{сум}R_{монт}C_{сум} + R_{сум}R_{нагр}C_{сум} + R_{сум}R_{р_{сум}}C_{сум} + R_{монт}R_{р_{сум}}C_{сум} + R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{сум}) + \sqrt{D}] / [2(R_{нагр}R_{монт}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{монт}R_{р_{сум}}C_{уск}C_{сум})];$$

$$d_2 = [-(R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}} + R_{сум}R_{монт}C_{сум} + R_{сум}R_{нагр}C_{сум} + R_{сум}R_{р_{сум}}C_{сум} + R_{монт}R_{р_{сум}}C_{сум} + R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{сум}) - \sqrt{D}] / [2(R_{нагр}R_{монт}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{монт}R_{р_{сум}}C_{уск}C_{сум})];$$

$$D = (R_{нагр}R_{монт}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{уск} + R_{р_{сум}} + R_{сум}R_{монт}C_{сум} + R_{сум}R_{нагр}C_{сум} + R_{сум}R_{р_{сум}}C_{сум} + R_{монт}R_{р_{сум}}C_{сум} + R_{нагр}R_{р_{сум}}C_{сум})^2 - 4(R_{нагр}R_{монт}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{р_{сум}}R_{сум}C_{сум}C_{уск} + R_{нагр}R_{монт}R_{р_{сум}}C_{уск}C_{сум})$$

$$+ R_{нагр}R_{монт}R_{р_{сум}}C_{уск}C_{сум}) \times (R_{монт} + R_{нагр} + R_{р_{сум}}).$$

Согласно приведенным формулам построены графики, показывающие интересные временные параметры. Фронт импульса высокого напряжения сформированного на системе ускоряющих электродов приведен на рис. 3.

Из графика видно, что длительность фронта импульса равна одной микросекунде, что полностью удовлетворяет условию по скорости формирования импульса высокого напряжения. Так частица со скоростью 1000 м/с (типичная скорость вылета частицы из инжектора пылевых частиц [6]), за время формирования пройдет 1 мм пути. Данное быстроедействие позволяет строить многокаскадные импульсные ускорители, где скорость влета частицы в следующие ступени значительно выше.

Как говорилось выше, длительность импульса должна быть больше времени пролета частицы ускоряющих электродов. Возьмем для оценки невыполнимый случай, при котором частица движется с постоянной скоростью 1 км/с, а общая длина системы ускорительных электродов равна двум метрам, при таких параметрах длительность импульса должна быть более двух миллисекунд. На рис. 4 показан интересный нас фрагмент импульса высокого напряжения, из которого видно, что за две миллисекунды напряжение импульса снизится на 23 кВ, что составляет 1,3 % от максимального напряжения импульса. Из этого можно сделать вывод, что длительности импульса достаточно даже для самых медленных, не поддающихся ускорению частиц, для всех реальных случаев ситуация будет только лучше, что позволяет считать

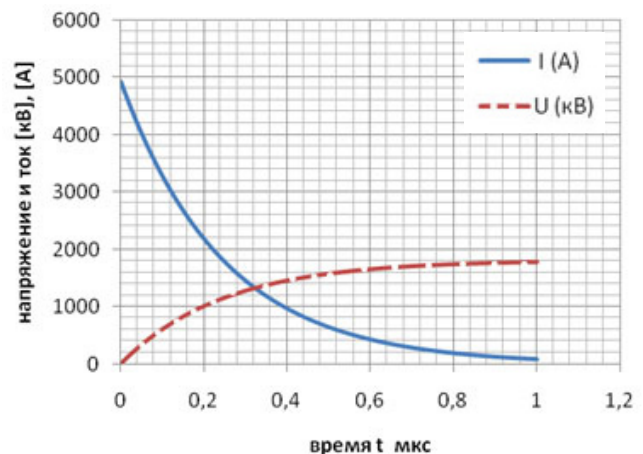


Рис. 3. Фронт импульса на ускоряющих электродах от времени

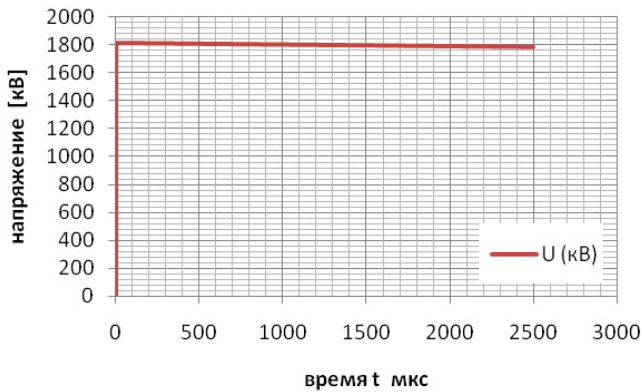


Рис. 4. Импульс высокого напряжения на ускорительных электродах

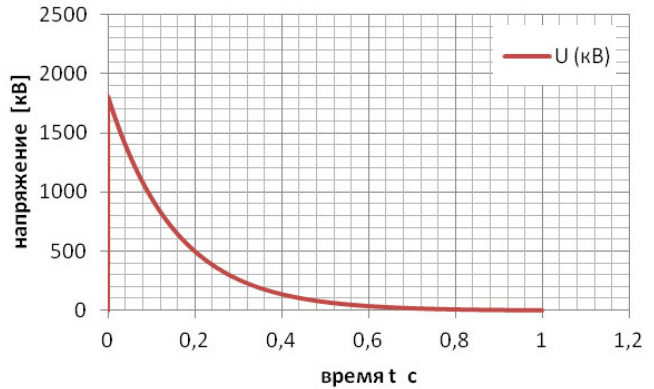
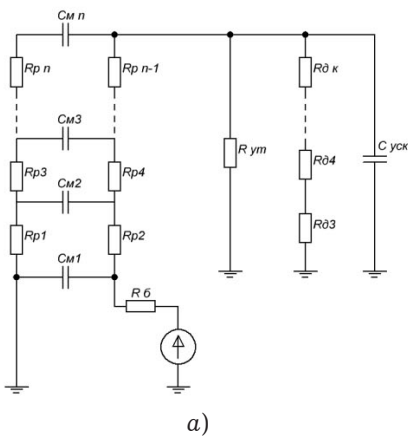
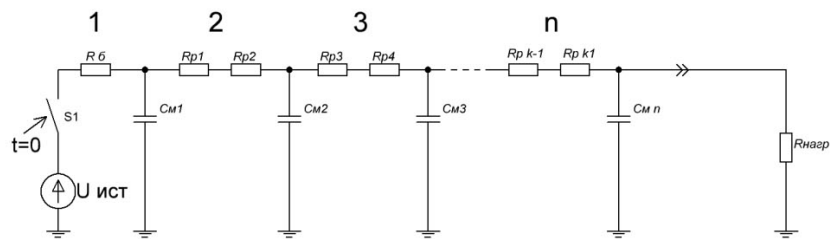


Рис. 5. Импульс высокого напряжения на ускорительных электродах



а)



б)

Рис. 6. Эквивалентная схема одного каскада импульсного ускорителя в режиме зарядки

ускоряющее напряжение постоянным и равным максимальному напряжению импульса ГИН.

Оценить общий вид импульса и его длительность можно на рис. 5, из которого видно, что максимальное напряжение импульса равно 1,81 МВ, а это и есть эффективное напряжение одной ступени импульсного ускорителя при заданных начальных условиях. Время, необходимое для разрядки емкости ускоряющих электродов равно примерно одной секунде, при этом остаточное напряжение составляет один киловольт.

Следует обратить внимание, что большую часть времени импульса, изображенного на рис. 5, ГИН не передает энергии ускорителю, вся энергия передается в момент формирования фронта, что хорошо видно из графика тока (рис. 3), следовательно, после формирования импульса высокого напряжения, длительность которого около одной микросекунды, ГИН можно заряжать для следующего цикла. Для того, чтобы оценить время необходимое на приведение системы в состояние готовности, кроме времени разряда емкости ускоряющих электродов, необходимо знать время зарядки емкостей ГИН.

Для этого рассмотрим переходные процессы на эквивалентной схеме ГИН в режиме подзарядки рис. 6. Здесь  $n$  – число ступеней ГИН,  $k$  – количество разделительных сопротивлений, сопротивление нагрузки приведено в предыдущей части. Удобнее всего рассматривать процесс зарядки как заряд отдельных каскадов ГИН, причем начальные данные. Такие как входное сопротивление и напряжение питания для каждой ступени, являются результатом расчета предыдущего каскада в предыдущий момент времени.

Рассмотрим поэтапно заряд каждой ступени:  $R_{вх}(1) = R_б$  – для первой ступени ГИН,  $R_{вх}(2) = R_{p1} + R_{p2}$ ;  $R_{вх}(n) = R_{p(k-1)} + R_{pk}$  – для второй и  $n$ -ой ступени соответственно;  $U_{пит}(1) = U_{ист}$  – напряжение питания первой ступени;  $U_{пит}(n) = U_{1;2}(n-1)$  – напряжение питания  $n$ -ой ступени;

$$R_{сум}(1) = \sum_{i=1}^k R_{pi} + R_{нагр}$$

для первой ступени ГИН,

$$R_{сум}(2) = \sum_{i=3}^k R_{pi} + R_{нагр};$$

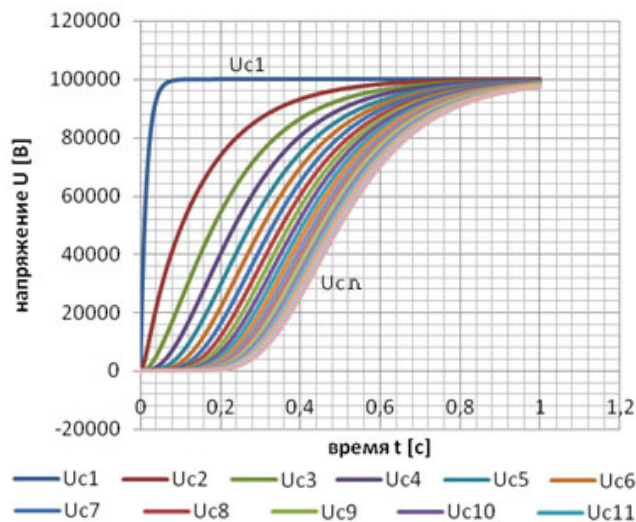


Рис. 7. Процесс зарядки ступеней ГИН

$$R_{сум}(n) = \sum_{i=n+2}^k R_{pi} + R_{нагр}$$

– для второй и  $n$ -ой ступени соответственно.

Напряжение на участке 1;2, отражающее заряд накопителя данной ступени, будет иметь следующий вид:

$$U_{1;2}(t) = \frac{U_{пит} R_{сум}}{R_{сум} + R_{вх}} + \frac{U_{пит} R_{сум}}{p_1 R_{сум} R_{вх} C_m} e^{p_1 t}, \quad (4)$$

где

$$p_1 = -\frac{R_{сум} + R_{вх}}{R_{сум} R_{вх} C_m}.$$

На рис. 7 показан процесс зарядки ГИН для каждой ступени. Из графиков видно, что зарядка ГИН происходит примерно за одну секунду, и для крайней ступени это время соответствует заряду до напряжения 97,3 кВ.

Согласно результатам о длительности разряда емкости ускорительных электродов и времени заряда емкостей ГИН можно сделать вывод, что время приведения системы в состояние готовности составляет примерно одну секунду. Что соответствует частоте пролета частиц равной 1 Гц. Примерно на такой же частоте следования частиц работает линейный электродинамический ускоритель [4]. При необходимости время заряда ГИН можно сократить, заменив разделительные сопротивления высоковольтными разделительными дросселями, а время разряда емкости электродов можно уменьшить, добавив систему стекания заряда, причем к этой системе нет жестких требований, так как ускорение частицы происходит за первые миллисекунды импульса, остальная часть импульса является бесполезной и ее можно отсекал любым методом, например

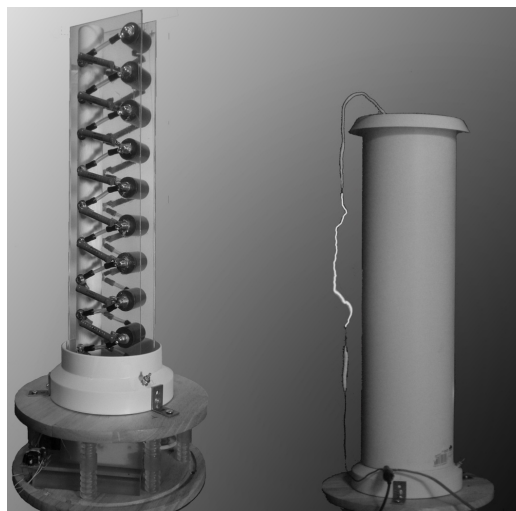


Рис. 8. Модель управляемого ГИН с напряжением 200 кВ

механическим, снимать заряд лазером или инициировать электрический пробой на землю по сигналу датчика скорости или влета частицы в следующую ступень ускорителя.

### 3. Конструктивные особенности ГИН

Особую сложность представляет система управления ГИН, точнее система инициации разряда. Одной из задач, которую должна решить эта система, это стабильное управление ГИН по первому разряднику. Для проведения испытаний данной методики была собрана физическая модель ГИН (рис. 8), состоящая из 10 ступеней с напряжением питания 24 кВ.

Разрядники были выполнены воздушными, причем восемь разрядников пассивные а первый управляемый со средним поджигающим электродом. Разрядники были настроены на напряжение срабатывания 30 кВ, что исключало ложные срабатывания ГИН. При подаче поджигающего импульса на первый разрядник, первая и вторая ступень соединяется последовательно, что вызывает двукратный скачок напряжения на следующем разряднике, тем самым активируя его пробой. Таким образом, происходит лавинообразное срабатывание всех разрядников ГИН и на его выходе образуется суммарное напряжение всех ступеней. Для дополнительной синхронизации процесса все разрядники предлагается разместить параллельно друг другу в общей камере, такое расположение добавит в лавинообразную природу срабатывания ГИН фактор засветки разрядных промежутков жестким ультрафиолетом, генерируемым ранее сработавшими разрядниками. Камеру можно заполнить герметичной и наполнить элегазом, это

позволит сделать параметры разрядников более стабильными и независимыми от внешних условий, а так же продлить срок эксплуатации без дополнительного обслуживания.

В процессе испытаний после настройки разрядников ложных срабатываний замечено не было вплоть до повышения напряжения питания до 28 КВ. После настройки управляемого разрядника каждый запускающий импульс стабильно приводил к пробое основного промежутка, выставленного на 240 мм, что свидетельствует о возможности создания надежного управляемого по первому разряднику ГИН, а так же о полной зарядке всех емкостей генератора.

### Заключение

В данной статье рассмотрен импульсный ускоритель, предназначенный для ускорения твердых пылевых заряженных частиц. Как показало математическое и физическое моделирование, описанный метод работоспособен и на его основе может быть построен реальный ускоритель с улучшенными характеристиками. Импульсный ускоритель обладает простой модульной конструкцией, причем он не имеет принципиальных ограничений в конечной скорости частиц. Скорость частиц можно повысить как через увеличение эффективного напряжения одной ступени, так и через увеличение числа ступеней. Следует отметить, что система управления ускорителем чрезвычайно проста и выполняет единственную функцию – генерацию поджигающего импульса через определенное время задержки, которое является функцией скорости частицы на влете в ускорительную ступень, причем это время может быть заранее подсчитано или же считаться в реальном времени. В случае построения многоступенчатой конструкции источник питания для всех ступеней может быть общим, причем рассчитанный на работу всего с одной ступенью, так как зарядка будет происходить поочередно. Ускоритель идеально подходит для ускорения частиц с частотой следования до 1 Гц, без перехода на дроссельный ГИН и без применения дополнительных систем разряда. Несмотря на импульсный характер напряжения на ускорительных электродах, расчет скорости частицы можно проводить как для электростатического ускорителя, так как длительность импульса много больше времени нахождения частицы в области ускорения. Приращение скорости в таком ускорителе описывается выражением:

$$V_K = \sqrt{V_I^2 + 2 \frac{Q}{m} T_0 U_0},$$

где  $V_K$  – конечная скорость частиц;  $V_I$  – скорость инжекции частиц;  $Q$  – заряд частиц;  $m$  – масса частиц;  $T_0$  – коэффициент полезного действия ускоряющей системы;  $U_0$  – выходное напряжение генератора.

В статье рассмотрена одна ступень ускорителя на эффективное напряжение 1,8 МВ. Согласно приведенной выше формуле такая ступень даст наиболее вероятное приращение скорости в 10 км/с для пылевой частицы с удельным зарядом равным 30 и скоростью инжекции равной 1 км/с. Причем ступень является законченным модулем, который можно использовать в качестве начальной, средней или конечной ступени. Возможно создание ускорителя, состоящего из нескольких таких модулей для получения необходимой скорости частицы. При необходимости модуль импульсного ускорителя может являться частью комбинированного ускорителя.

### Список литературы

1. Friichtenicht J.F. Two-million-volt electrostatic accelerator for hypervelocity research // Rev. Sci. Instrum. 1962. № 34. P. 209–212.
2. Acceleration of micro-particles to hyper velocities by using a 3.75 mV Van de Graaff accelerator / S. Hasegawa [et al.] // Lunar and Planetary Science XXX. P. 1543–1544.
3. A linear accelerator for simulated micrometeors / J.C. Slattery [et al.] // Review of Scientific Instruments. 1973. Vol. 44. № 6. P. 755–762. (Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов / Дж.С. Слеттери [и др.] // Приборы для научных исследований. 1973. Т. 44. № 6. С. 89–97).
4. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов / Н.Д. Семкин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 140–147.
5. Fechtig H., Grun E., Kissel J. Laboratory simulation // Cosmic Dust; ed. J.A.M. McDonnell. Chichester: Wiley-Interscience, 1978. P. 607–669.
6. Инжектор заряженных пылевых частиц / Н.Д. Семкин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 3. С. 154–159. (A charged dust particle injector / N.D. Semkin [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2006. Vol. 49. № 3. P. 440–445).
7. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 90 с.
8. Wang Z., Wurden G.A. Hypervelocity dust beam injection for national spherical torus experiment // Review of Scientific Instruments. 2004. Vol. 75. № 10. P. 3436–3438.



9. Высокоскоростное метание твердых тел / Л.А. Мерзиевский [и др.] // Физика горения и взрыва. 1987. № 5. С. 77–91.
10. Инжекция, формирование потока и контроль параметров твердых частиц, ускоряемых на электростатическом генераторе ЭГ-8 / А.А. Бедняков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 2. С. 149–156.
11. Источник заряженных пылевых частиц / Н.Д. Семкин [и др.] // Патент на изобретение № 2242849, выдан в 2004г., БИ 2004 № 35.
12. Источник заряженных пылевых частиц / Н.Д. Семкин [и др.] // Патент на полезную модель № 58839, выдан в 2006 г.
13. Austin D.E. Impact-ionization mass spectrometry of cosmic dust // Thesis by Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. California Institute of Technology, Pasadena, California, 2003.
14. Berglund R.N., Liu B.Y.H. Generation of monodisperse aerosol standards // Environmental Science and Technology. 1973. № 7(2). P. 147–153.
15. Семкин Н.Д., Шепелев С.М. Исследование потоков микрочастиц при электростатическом диспергировании жидкости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2006. № 3. С. 44–51.
16. Новиков С.А., Петров В.А. Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций. М.: ЦНИИатоминформ, 1989. 60 с.
17. Friichtenicht J.F. Micrometeoroid simulation using nuclear accelerator techniques // Nucl. Instrum. Meth. 1964. № 28. P. 70–78.
18. Becker D.G., Friichtenicht J.F. Measurement and interpretation of the luminous efficiencies of iron and copper simulated micrometeors // The Astrophysical Journal. 1971. Vol. 166. № 15. P. 699–716.
19. Variable-frequency radially-stable micrometeoroid accelerator / D.G. Becker [et al.] // Review of Scientific Instruments. 1965. Vol. 36. № 10. P. 1480–1481 (Ускоритель для микрометеоритов / Д.Г. Беккер [и др.] // Приборы для научных исследований. 1965. № 10. С. 86–87).
20. Ускоритель высокоскоростных пылевых частиц / Н.Д. Семкин [и др.] // Патент на изобретение № 2205525, выдан в 2003г. РФ. 2003. С. 2.
21. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. Имитатор космической пылевой плазмы // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 7. С. 24–29.
22. Pozwolski A. A compact laser-driven accelerator of macroparticles // Laser and Particle Beams. 2001. № 19. P. 249–252.
23. Циклический ускоритель высокоскоростных твердых частиц / Н.Д. Семкин [и др.] // Заявка на изобретение № 2006144682 от 14.12.2006.
24. Манзон Б.М. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза // Успехи физических наук. 1981. Т. 134. Вып. 2. С. 611–639.

---

## Dust particle accelerator pulse

*K.I. Sukhachev, N.D. Semkin, A.V. Piyakov*

Pulse method is considered to accelerate and conditions for the implementation of this method. The analysis of the design of the accelerator operating at pulse method of particle acceleration. Mathematical modeling of the one-stage pulsed accelerator. The possible ways to control voltage pulse generator based on a physical model. The possible improvement of pulsed accelerator.

*Keywords:* pulse accelerator, high-voltage impulse generator, simulation, calculation speed.

---