

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2017. № 02. С. 18–36.

DOI: [10.24108/rdopt.0217.0000097](https://doi.org/10.24108/rdopt.0217.0000097)

Представлена в редакцию: 06.02.2017

Исправлена: 20.02.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.319

## Переходные процессы в электростатических системах

Ситников А.В.<sup>1,\*</sup>, Масленникова С.И.<sup>1</sup>

[\\*sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В представленной работе дается описание явления статического электричества, предложена емкостная модель электростатической системы, проведен расчет зарядно-разрядных электростатических явлений при взаимодействии корпуса летательного аппарата с набегающим воздушным потоком, построены графики переходных процессов, возникающих при этом. По результатам расчетов переходных процессов сделан анализ параметров помех работе радиоэлектронной аппаратуры летательного аппарата, возникающих при появлении разрядных явлений в электростатической системе «Летательный аппарат - Набегающий воздушный поток». В работе также проанализирована эффективность использования пассивных систем защиты летательных аппаратов от избыточного электростатического потенциала на корпусе, а также предложена блок-схема устройства для использования статического напряжения в качестве источника питания маломощных электронных схем.

**Ключевые слова:** электростатический потенциал; коронный разряд; искровой разряд; переходные процессы; разрядные устройства

---

### Введение

Явление статического электричества известно с незапамятных времен. С изучения этого явления началась наука «Электростатика», продолжением которой стали «Электродинамика», «Электротехника», «Электроника». Использовать это явление стали также очень давно. В девятнадцатом веке эксперименты со статикой проводили в форме представлений иллюзионистов. Волшебное притягивание фольги к руке, поджигание искрой, исходящей из пальца «мага», спирта вызывали как минимум овации, а то и обмороки особо впечатлительных зрителей.

Но до сих пор появление статического высокого потенциала на двух входящих во взаимодействие поверхностей, в подавляющем большинстве случаев, приносит лишь вред многим техническим устройствам и зачастую является причиной аварий и даже катастроф. В производственных цехах, связанных с использованием легко воспламеняющихся и взрывоопасных материалов, искра, возникающая от разряда статического электричества, может вызвать непоправимые последствия. Серьезную опасность таит спасательный ме-

таллический трос от вертолета к терпящему бедствие человеку, особенно если последний находится в воде. При ударе током от заряда статического электричества, человек может потерять сознание и утонуть. Статический потенциал на жале паяльника или даже на пальцах радиомонтажника может привести к выходу из строя микросхемы, выполненной по КМОП-технологии.

Огромные проблемы вызывают на борту летательного аппарата (ЛА) разряды статического электричества, срывающиеся с корпуса. Импульсные помехи создают перебои связи, могут вывести из строя навигационные приборы и микропроцессорные системы управления. Серьезную опасность несут разряды в случае, когда воздух насыщен взрывоопасными парами, например, при заправке транспортного средства топливом, при перевозке взрывоопасных химикатов.

Но нельзя забывать, что статическое электричество – это источник электроэнергии, причем, для получения которой не нужно создавать никаких дополнительных технических приспособлений. Нужно научиться использовать эту энергию, превратить вред в пользу.

Конечно, сегодня разрабатываются различные устройства, в основе функционирования которых лежит принцип взаимодействия заряженных частиц. Например, в электростатических фильтрах очищаемый воздух прокачивается между ионизирующими воздух электродами, при этом частицы пыли захватываются ионами и осаждаются на электродах, заряженных противоположно частицам пыли. [1, 2]. Статический заряд используется и при нанесении тонкопленочных (пленочных) покрытий (покраска, металлизация и т.д.) [3, 4, 5]. При этом процесс нанесения покрытий легко управляем с помощью электронной, микропроцессорной техники.

Интересным вариантом использования накопления зарядов на границе между двумя различными диэлектрическими средами или проводящей и диэлектрической средой является создание электронных запоминающих устройств. В конструкции униполярных транзисторов с изолированным затвором статический заряд возникает на границе раздела слоев диэлектрика, который делают двухслойным: нитрид кремния и двуокись кремния ( $\text{SiN}_4$  –  $\text{SiO}_2$ ). Такие транзисторы называют МНОП-транзисторами в соответствии с их структурой: металл-нитрид кремния-окисел-полупроводник. При изменении электрического напряжения возникает гистерезис заряда на границе раздела двух слоев диэлектрика, что и позволяет использовать такие элементы в качестве запоминающих ячеек. Запись информации в ячейки на МНОП-транзисторах осуществляется подачей повышенного (по отношению к рабочему) напряжения. Стирание информации происходит при подаче напряжения на основной затвор транзистора, при этом за счет туннельного эффекта заряд рассеивается [6, 7].

Интересным, но не нашедшим широкого применения, можно признать использование «электрического ветра», возникающего при создании электростатического поля от высокой плотности зарядов на какой-либо поверхности. Ионы воздуха под воздействием этого поля начинают перемещаться в сторону противоположно заряженной поверхности, в результате чего и возникает воздушный поток. [8].

Однако в качестве альтернативного источника энергии статическое электричество не используется.

Существуют только технические средства защиты от статики. При этом разность потенциалов, возникающая на поверхностях диэлектриков при, например, механическом разделении этих поверхностей, может достигать очень высоких значений (десятков киловольт). Воздух в случае превышения напряжением порогового значения теряет свои диэлектрические свойства, возникает лавинообразный процесс пробоя, т.е. возникновения электрической дуги. Энергия искры при пробое зависит от электрического напряжения между заряженными поверхностями и емкости условного конденсатора, обкладками которого можно считать две заряженные поверхности.

Основными параметрами электростатической системы является электрическая емкость поверхности, приобретающей заряд. От этой емкости зависит энергия разряда, переходные процессы, возникающие в электростатической системе при накоплении заряда. Расчетам этих характеристик посвящена данная статья. В работе также уделяется внимание вопросам защиты ЛА от статического заряда и предлагается блок-схема устройства для использования статического электричества в качестве альтернативного источника энергии.

### **Физические основы природы возникновения статического электричества**

Явление электризация возникает при соприкосновении двух веществ с различными атомными и молекулярными силами притяжения зарядов на поверхности соприкосновения (разной работой выхода носителей заряда). Один из слоев должен быть диэлектриком. При контакте двух поверхностей, обладающих установившейся электростатической структурой, происходит перераспределение электронов и ионов на контактирующих поверхностях, при этом образуется двойной электрический слой. Такая структура характерна для плоского конденсатора (емкостного элемента).

Емкость такого условного конденсатора определяется формулой:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная ( $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ );  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками;  $S$  – площадь пластины;  $d$  – расстояние между пластинами.

Если учесть, что расстояние между обкладками условного конденсатора очень мало, а площадь обкладок велика, то емкость  $C$  даже при малом значении диэлектрической проницаемости может достигать десятков, а то и сотен микрофарад.

Если принять  $\varepsilon = 1$  (диэлектрическая проницаемость воздуха),  $S = 1 \text{ м}^2$ ,  $d = 1 \text{ мкм}$ , то в результате расчета получим емкость:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} = \frac{8.854187817 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 1}{1 \cdot 10^{-6}} = 8.85 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

т.е.  $C \approx 9 \text{ мкФ}$ .

Принимая во внимание емкостную модель системы, можно рассматривать статическое электричество, как разность потенциалов, возникающую на обкладках емкостного

элемента при отсутствии внешнего источника напряжения (источника, как электромагнитного устройства). Но, в любом случае, появление потенциала является результатом перераспределения электрической энергии в слое диэлектрика. Т.к. диэлектрик – это вещество, не имеющее свободных носителей заряда (электронов), то перераспределение электрической энергии может являться результатом переориентации поляризованных молекул, возникающее под действием внешних сил. Разность потенциалов неизбежно возникает также при взаимодействии двух тел, обладающих различным зарядом.

Если тело имеет плоскую форму бесконечной площади и однородную структуру, то заряды распределяются равномерно по его поверхности, но это только при отсутствии или при равномерном внешнем электрическом поле. Если тело состоит из неполяризованных молекул и является диэлектриком, то поверхностный заряд тела будет равен нулю. При несоблюдении хотя бы одного из перечисленных условий (а соблюдение всех условий невозможно), на поверхности тела возникает неравномерное распределение зарядов, что приводит к появлению электрических полей, вызывающих, в свою очередь, перераспределение зарядов внутри тела (поляризация диэлектрика) и на поверхности (поверхностный статический заряд).

Следовательно, можно сделать следующий вывод: поверхностный статический заряд возникает, во-первых, как результат взаимодействия двух тел, обладающих различными электростатическими характеристиками, во-вторых, как результат влияния на тело «неэлектрических» энергий (механической, тепловой, излучения и т.д.).

Таким образом, статический заряд на поверхности двух практически идентичных диэлектриков может быть получен путем механического взаимодействия поверхностей (соударение, трение), изменением температуры одного из слоев, при появлении, например, загрязнений между слоями (нарушение однородности электростатического состояния), не говоря уже про такие воздействия, как расплавление или испарение тел. Т.е. можно сделать еще один вывод: появление электростатического заряда на поверхности тела является естественным явлением, сопровождающим, практически, любые физические процессы. Следовательно, статическое электричество можно использовать не только для создания сложных технологических процессов, но и в качестве возобновляемого и экологически чистого источника электроэнергии.

### **Характеристики электростатического поля и емкость заряженной поверхности**

При вычислении емкости важно правильно учитывать диэлектрическую проницаемость среды. Например, если тело в виде наэлектризованной пластины находится над заземленной поверхностью на расстоянии, намного превышающем толщину пластины, то достаточно в качестве диэлектрика учитывать только толщину слоя воздуха между пластиной и заземленной поверхностью. Если же наэлектризованная пластина расположена на заземленной проводящей подложке, необходимо учитывать диэлектрическую проницаемость самой пластины. Если же пластина состоит из нескольких слоев с различной ди-

электрической проницаемостью, результирующая емкость вычисляется по общему правилу для последовательно соединенных конденсаторов.

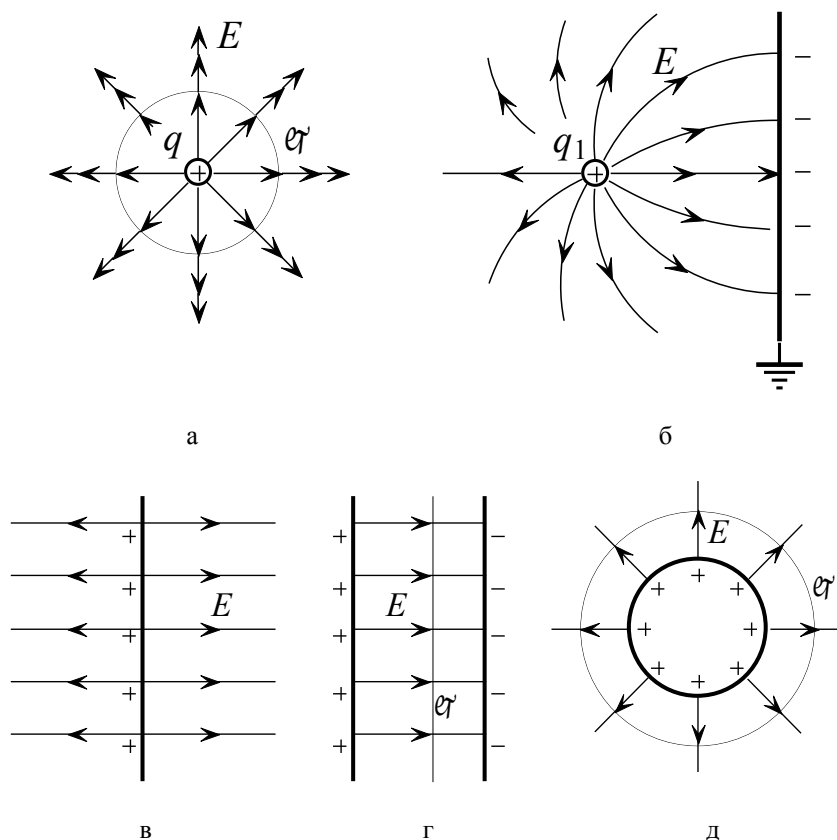
При этом, емкость плоского конденсатора рассчитывается по формуле, уже приведенной выше:  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ . Емкость сферы можно определить по формуле:  $C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon R$ , емкость цилиндра

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon}{\operatorname{arsh} \frac{1}{R} - \sqrt{R^2 l^2 + l + Rl}}$$

где  $R$  – радиус сферы или цилиндра соответственно;  $l$  – длина цилиндра.

Для расчета емкости корпуса транспортного средства (самолета, вертолета, автомобиля) можно использовать формулу, применимую для тел цилиндрической или сферической формы, только в очень приближенных расчетах, т.к. корпус транспортного средства имеет множество поверхностей сложной конфигурации (выступов, впадин). Для самолета – это крылья, хвостовое оперение, искажение кривизны фюзеляжа, иллюминаторы, элероны, рули высоты и т.д.

На рис. 1 представлены конфигурации простейших электрических полей создаваемых точечным зарядом и заряженными телами плоской и сферической форм.



**Рис. 1.** Конфигурация электрического поля для: а – одиночного уединенного точечного заряда; б – точечного заряда над заземленной поверхностью; в – уединенной заряженной плоскости; г – двух параллельных заряженных плоскостей; е – уединенной заряженной сферы

На рис. 1 обозначено:  $E$  – напряженность электрического поля;  $\varphi$  – эквипотенциальная поверхность;  $q$  – точечный заряд.

Напряженность электрического поля у поверхности наэлектризованного тела, например сферы, при постоянной линейной плотности заряда на единицу длины возрастает при увеличении кривизны (уменьшении радиуса сферы рис. 1):

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2},$$

где  $R$  – радиус сферы;  $q$  – заряд, равномерно распределенный по поверхности или объему.

Для электрического поля цилиндра напряженность также увеличивается при уменьшении радиуса кривизны его поверхности:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon R} \cdot \frac{q}{l},$$

где  $R$  – радиус цилиндра;  $\frac{q}{l}$  – удельный заряд (заряд на единицу длины цилиндра). Следовательно, вокруг выступающих частей на поверхности корпуса транспортного средства напряженность поля существенно выше, чем на поверхностях с большим радиусом кривизны. Именно в этих местах и возникает пробой диэлектрика (разряд) при превышении потенциалом статического заряда критического значения.

Область, охваченная разрядом, определяется границей, за которой напряженность электрического поля уже недостаточна для дальнейшего распространения разряда. Такой незавершенный разряд вблизи поверхностей с малым радиусом кривизны называют коронным. Внешне он проявляется в слабом свечении вокруг выступающих поверхностей и потрескивании. Если напряженность электрического поля выше уровня, при котором возникает инвариантный коронный разряд, то разряд приобретает вид электрической дуги. Этот вид разряда, как правило, является кратковременным (см. рис. 2) и развивается с заряженной поверхности, вокруг которой напряженность электрического поля наибольшая, т.е. с поверхностей, радиус кривизны которых наименьший.

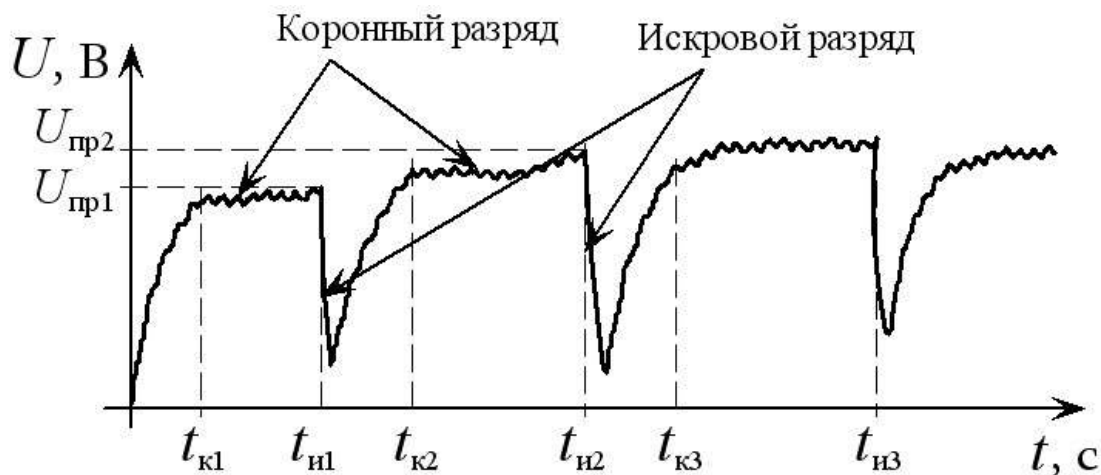


Рис. 2. График изменения статического потенциала

На графике рис. 2 моменты времени  $t_{к1}, t_{к2}, t_{к3}$  соответствуют возникновению режима коронного разряда,  $t_{и1}, t_{и2}, t_{и3}$  – искрового пробоя. Неравномерность нарастания потенциала и различные уровни напряжения искрового пробоя ( $U_{пр1}, U_{пр21}$ ) являются результатом воздействия на систему таких внешних факторов, как влажность воздуха, уровень ионизации воздуха, температура, наличие пыли и т.д.

По мере распространения разряда от одного электрода (заряженной поверхности) к другому, радиус кривизны которого больше, например, от заземленного стержня к заряженной поверхности диэлектрика, искровой канал разряда у поверхности, где распределение электрического поля равномерное, размывается и может переходить в диффузное свечение. Это явление объясняется тем, что заряды наэлектризованной диэлектрической поверхности распределены неравномерно из-за низкой электропроводности и не могут стекать в канал разряда.

Если в качестве противоположно заряженной поверхности относительно корпуса транспортного средства принять ионизированный слой воздушной массы, то разряды статического электричества формируются от выступающих частей корпуса по каналом с наименьшим сопротивлением на заряженную область воздушной массы. Наименьшим сопротивлением, при этом, обладает часть воздушной массы, вступающая во взаимодействие с транспортным средством.

Для самолета – это воздушный поток, срывающийся с кромок крыльев и хвостового оперения, а также вблизи реактивных струй выхлопа двигателя, где ионизация воздуха достигает наибольшего значения. Для вертолета наибольшая электризация корпуса наблюдается на вращающемся винте и в области выхлопа двигателя. Для автомобиля – на кромках заднего стекла и заднего бампера, а также на кромках решетки радиатора и на выступающих элементах двигателя при обдуве его холодными потоками встречного воздуха.

Для автомобиля разряды статического напряжения не приводят к возникновению аварийных режимов (за исключением транспортных средств, перевозящих взрывоопасные и горючие материалы). Для летательных аппаратов явление разряда статического электричества может привести к сбою в работе аппаратуры и созданию аварийной ситуации на борту.

## **Переходные процессы в электростатической системе ЛА**

Рассмотрим подробнее процесс формирования заряда на корпусе летательного аппарата в полете. Для этого воспользуемся емкостной моделью электростатической системы. Упрощенно можно представить такую систему в виде электрической схемы, изображенной на рис. 3.

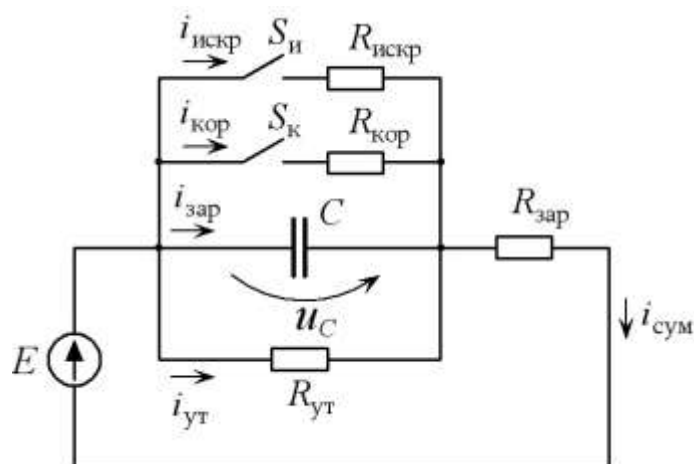


Рис. 3. Упрощенная электрическая модель электростатической системы

На схеме рис. 3 обозначено:  $E$  – источник ЭДС, моделирующий электрические силы, способствующие разделению зарядов между воздушной массой и корпусом летательного аппарата;  $C$  – конденсатор, моделирующий накопление заряда на корпусе ЛА;  $R_{ут}$  – ветвь, моделирующая токи утечки заряда с корпуса ЛА;  $R_{зар}$  – сопротивление ограничивающее ток заряда электростатической системе ЛА;  $R_k, S_k$  – ветвь, моделирующая процесс возникновения коронного разряда;  $R_{и}, S_{и}$  – ветвь, моделирующая процесс возникновения искрового разряда.

Возникновение коронного разряда происходит в цепи при достижении напряжения на корпусе летательного аппарата пороговой величины  $U_{пор к}$  (в этот момент происходит замыкание ключа  $S_k$ ). При этом сопротивление межэлектродного пространства емкостной системы резко снижается из-за процессов лавинной ионизации воздуха. Токи утечки увеличиваются. При достижении значения напряжения на корпусе ЛА уровня, при котором возникает искровой пробой  $U_{пор и}$  (в этот момент происходит замыкание ключа  $S_{и}$ ). В этом режиме токи утечки становятся существенно выше зарядных токов.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) разрядной ветви  $R_{и}, S_{и}$  приближается к ВАХ варистора [9], вид которой представлен на рис. 4.

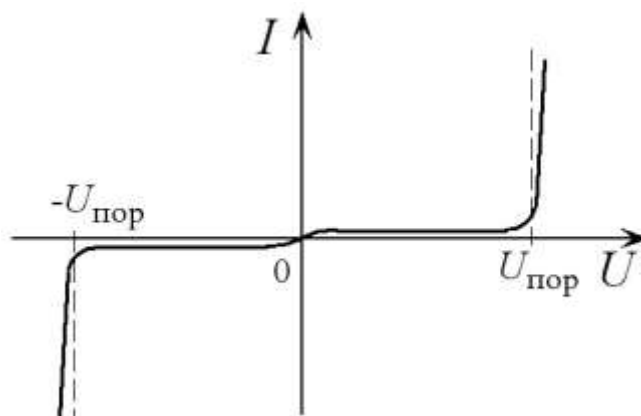


Рис. 4. ВАХ варистора



Для расчета переходных процессов необходимо определиться с параметрами моделирующих элементов схемы рис. 3.

Величина ЭДС источника  $E$  очень велика. Для идеальной модели – равна бесконечности, в реальности напряжение может достигать значений сотен киловольт. Сопротивление  $R_K$  на три-четыре порядка меньше сопротивления  $R_{ут}$ , сопротивление  $R_{и}$  на два порядка меньше сопротивления  $R_K$ . Примем начальные условия нулевыми, тогда переходной процесс, возникающий в цепи первого порядка рис. 3 при разомкнутых ключах  $S_K$  и  $S_{и}$  будет определяться выражением:

$$u_{C \text{ зар}}(t) = U_{C \text{ зар}}(\infty) + A_{\text{зар}} e^{-s_{\text{зар}} t},$$

где  $U_{C \text{ зар}}(\infty)$  – установившееся значение напряжения на конденсаторе после окончания переходного процесса;  $A_{\text{зар}}$  – коэффициент, определяемый из начальных условий;  $s$  – корень характеристического уравнения [10].

Напряжение  $U_{C \text{ зар}}(\infty)$  можно определить по формуле:

$$U_{C \text{ зар}}(\infty) = \frac{E \cdot R_{ут}}{R_{ут} + R_{зар}} \approx E.$$

Характеристическое уравнение цепи рис. 3 при разомкнутых ключах  $S_K$  и  $S_{и}$  имеет вид:

$$\frac{1}{C s_{зар}} + \frac{R_{ут} \cdot R_{зар}}{R_{ут} + R_{зар}} = 0.$$

Корень характеристического уравнения:

$$s_{зар} = -\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} \right) \approx -\frac{1}{C R_{зар}}.$$

Подставив значения  $U_{C \text{ зар}}(\infty)$  и  $s$  в уравнение  $u_{C \text{ зар}}(t)$ , получим:

$$u_{C \text{ зар}}(t) = E + A_{\text{зар}} e^{-\frac{1}{C R_{зар}} t}.$$

Для определения значения коэффициента  $A$  подставим в это уравнение  $t = 0_+$  и, учитывая  $U_C(0_+) = U_C(0_-) = 0$ , получим  $A_{\text{зар}} = -E$  и, следовательно,

$$u_{C \text{ зар}}(t) = E - E e^{-\frac{1}{C R_{зар}} t}.$$

График напряжения на конденсаторе представляет собой экспоненту идущую из нуля и стремящуюся к значению  $E$ .

При достижении напряжением  $u_{C \text{ зар}}(t)$  порогового значения  $U_{\text{порк}}$ , т.е. напряжения, при котором возникает коронный разряд, в цепи замыкается ключ  $S_K$ . Обозначим этот момент времени, как  $t_{к1}$ . Конфигурация схемы изменяется. Параллельно сопротивлению  $R_{ут}$  включается сопротивление  $R_K$ . При этом значение напряжение на конденсаторе  $U_{C \text{ к}}(\infty)$  можно рассчитать по формуле:

$$U_{C \text{ к}}(\infty) = \frac{E \cdot R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K}.$$

Корень характеристического уравнения при этом будет

$$s_K = -\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} + \frac{1}{R_K} \right).$$

Начальными условиями для расчета переходного процесса является напряжение на конденсаторе в момент замыкания ключа  $S_K$  (момент времени  $t_{K1}$ ):

$$u_{C_{зар}}(t_{K1}) = E - E e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}})t_{K1}}.$$

Следовательно, можно записать:

$$\begin{aligned} u_{C_K}(t) &= U_{C_K}(\infty) + A_K e^{-s_K t} = \\ &= \frac{E \cdot R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K} + A_K e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} + \frac{1}{R_K})t}. \end{aligned}$$

Принимая момент времени  $t_{K1}$  за момент коммутации, т.е.  $t = t_{K1} = 0$ , можно рассчитать значение коэффициента при экспоненте:

$$A_K = E \left( 1 - \frac{R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K} - e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}})t_{K1}} \right).$$

Напряжение на конденсаторе будет определяться по следующему закону:

$$\begin{aligned} u_{C_K}(t) &= U_{C_K}(\infty) + A_K e^{-s_K t} = \\ &= \frac{E \cdot R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K} + E \left( 1 - \frac{R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K} - \right. \\ &\quad \left. - e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}})t_{K1}} \right) e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} + \frac{1}{R_K})t}. \end{aligned}$$

При достижении напряжением  $u_{C_K}(t)$  порогового значения  $U_{пор и1}$ , т.е. напряжения, при котором возникает искровой разряд в цепи рис. 3, замыкается ключ  $S_{и}$ . Обозначим этот момент времени, как  $t_{и1}$ . Конфигурация схемы изменяется. Параллельно сопротивлениям  $R_{ут}$  и  $R_K$  включается сопротивление  $R_{и}$ . Если ввести обозначение параллельного включения сопротивлений  $R_{ут}$ ,  $R_K$  и  $R_{и}$ , как  $R_{пар и}$ , то значение напряжения на конденсаторе  $U_{C_{и}}(\infty)$  можно рассчитать по формуле:

$$U_{C_K}(\infty) = \frac{E \cdot R_{пар и}}{R_{пар и} + R_{зар}}.$$

Корень характеристического уравнения при этом будет

$$s_K = -\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{пар и}} + \frac{1}{R_{зар}} \right).$$

Начальными условиями для расчета переходного процесса является напряжение на конденсаторе в момент замыкания ключа  $S_{и}$  (момент времени  $t_{и1}$ ):

$$\begin{aligned} u_{C_K}(t_{и1}) &= \frac{E \cdot R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K} + E \left( 1 - \frac{R_{ут} \cdot R_K}{R_{ут} \cdot R_K + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_K} - \right. \\ &\quad \left. - e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}})t_{K1}} \right) e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} + \frac{1}{R_K})t_{и1}} \end{aligned}$$

Следовательно, можно записать:

$$u_{C_{и}}(t) = U_{C_{и}}(\infty) + A_{и} e^{-s_{и} t} = \frac{E \cdot R_{пар и}}{R_{пар и} + R_{зар}} + A_{и} e^{-\frac{1}{C}(\frac{1}{R_{пар и}} + \frac{1}{R_{зар}})t}.$$

Принимая момент времени  $t_{и1}$  за момент коммутации, т.е.  $t = t_{и1} = 0$ , и вводя обозначение коэффициента деления резистивного делителя

$$k_{дел\ к} = \frac{R_{ут} \cdot R_{к}}{R_{ут} \cdot R_{к} + R_{зар} \cdot R_{ут} + R_{зар} \cdot R_{к}}$$

можно рассчитать значение коэффициента при экспоненте:

$$A_{и} = E \left( k_{дел\ к} + \left( 1 - k_{дел\ к} - e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} \right) t_{к1}} \right) e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{пар\ и}} + \frac{1}{R_{зар}} \right) t_{и1}} - \frac{R_{пар\ и}}{R_{пар\ и} + R_{зар}} \right).$$

Напряжение на конденсаторе будет определяться по следующему закону:

$$\begin{aligned} u_{C\ и}(t) &= U_{C\ и}(\infty) + A_{и} e^{-s_{и} t} = \\ &= \frac{E \cdot R_{пар\ и}}{R_{пар\ и} + R_{зар}} + E \left( k_{дел\ к} + \left( 1 - k_{дел\ к} - e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{ут}} + \frac{1}{R_{зар}} \right) t_{к1}} \right) e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{пар\ и}} + \frac{1}{R_{зар}} \right) t_{и1}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{R_{пар\ и}}{R_{пар\ и} + R_{зар}} \right) e^{-\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{пар\ и}} + \frac{1}{R_{зар}} \right) t}. \end{aligned}$$

Для построения графиков переходных процессов зададим следующие параметры электростатической системы, приближенная модель которой изображена на схеме рис. 3:  $E = 10^5$  В;  $R_{ут} = 10^7$  Ом;  $R_{зар} = 10^5$  Ом;  $R_{к} = 2.5 \cdot 10^3$  Ом;  $R_{и} = 500$  Ом;  $C = 10^{-5}$  Ф. Примем значения пороговых напряжений:  $U_{пор\ к} = 2 \cdot 10^3$  В;  $U_{пор\ и1} = 2.4 \cdot 10^3$  В;  $U_{пор\ и2} = 100$  В. При этом получим следующие экспоненциальные функции, описывающие переходные процессы:

1) Заряд конденсатора до уровня, при котором возникает коронный разряд ( $0 < t < t_{к1}$ ):

$$u_{C\ зар}(t) = 9.901 \cdot 10^4 - 9.901 \cdot 10^4 e^{-1.01t}.$$

2) Коронный разряд ( $t_{к1} < t < t_{и1}$ ):

$$u_{C\ к}(t) = 2.439 \cdot 10^3 - 4.39 \cdot 10^2 e^{-41t}.$$

3) Искровой разряд ( $t_{и1} < t < t_{и2}$ ):

$$u_{C\ и}(t) = 50 + 2.35 \cdot 10^3 e^{-2001t}.$$

С момента времени  $t = t_{и2}$  цикл заряда конденсатора повторяется.

Момент времени, при котором возникает коронный и искровой разряды можно определить по формулам:

$$t_{к1} = \frac{1}{s_{зар}} \ln \frac{U_{C\ зар}(\infty) - U_{пор\ к}}{-A_{зар}} = \frac{1}{-1.01} \ln \frac{9.901 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^3}{9.901 \cdot 10^4} = 0.02 \text{ с};$$

$$t_{и1} = \frac{1}{s_{к}} \ln \frac{U_{C\ к}(\infty) - U_{пор\ и1}}{-A_{к}} = \frac{1}{-41} \ln \frac{2.439 \cdot 10^3 - 2.4 \cdot 10^3}{4.39 \cdot 10^2} = 0.06 \text{ с};$$

$$t_{и2} = \frac{1}{s_{и}} \ln \frac{-U_{C\ и}(\infty) + U_{пор\ и2}}{A_{и}} = \frac{1}{-2001} \ln \frac{-50 + 100}{2.35 \cdot 10^3} = 0.002 \text{ с}.$$

График переходного процесса изображен на рис. 4.

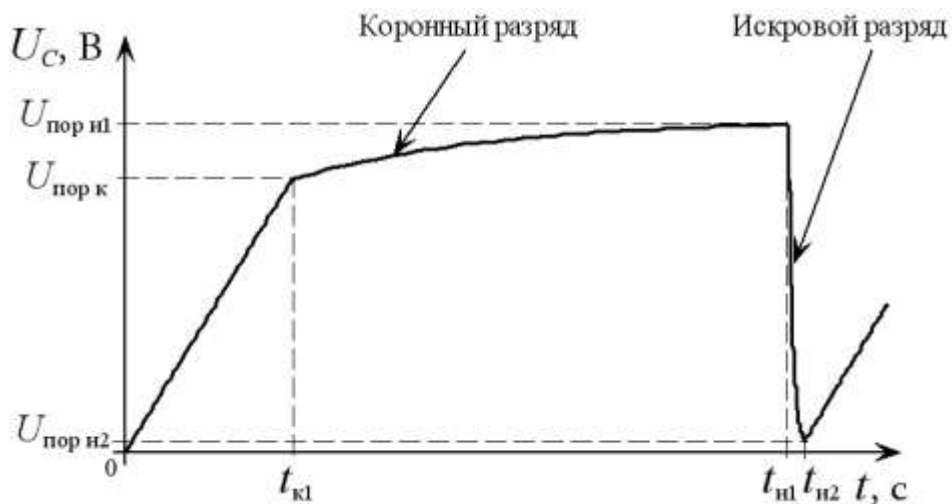


Рис. 5. График переходных процессов  $u_c(t)$

График рис. 5, построенный для емкостной модели электростатической системы (рис. 3) имеет вид, сходный с графиком, полученным экспериментальным путем (рис. 2).

Представленная модель является приближенной, однако она отражает характер изменений потенциалов, возникающих в электростатической системе «Летательный аппарат – Набегающий воздушный поток». Используя предложенную модель, можно также построить графики переходных процессов для токов в схеме рис. 3. Эти токи можно разделить на токи заряда, возникновение которых приводит к увеличению потенциала на корпусе ЛА (например, при взаимодействии его с набегающим воздушным потоком) и токи разряда, которые возникают за счет проводимости атмосферы, проводимости струи горячих газов выхлопа двигателя, при коронном разряде через заостренные части корпуса и искровых разрядов, срывающимися, опять же, с выступающих элементов корпуса ЛА. Пока токи заряда превышают токи разряда, потенциал корпуса ЛА возрастает. При возникновении больших токов разряда (например, искрового), потенциал падает.

К токам разряда можно отнести токи утечки, возникающие из-за проводимости средч между обкладками емкостного элемента ( $i_{ут}$  рис. 3) и токи коронного и искрового разрядов ( $i_{кор}$ ,  $i_{искр}$ ). Суммарный ток электростатической системы:

$$i_{сум} = i_{зар}(t) + i_{ут}(t) + i_{кор}(t) + i_{искр}(t).$$

Максимальное значение токи имею в моменты коммутации, т.е. при  $t = 0$ ,  $t = t_{к1}$ ,  $t = t_{и1}$ ,  $t = t_{и2}$  рис.4.

На практике для расчетов электростатической системы используют усредненное значение зарядных и разрядных токов. При этом учитываются характеристики конкретного транспортного средства (летательного аппарата): площадь активной поверхности корпуса, его конфигурация, наличие выступов на корпусе и впадин, скорость набегающего воздушного потока, наличие и концентрация в воздухе частиц, их размер, агрегатное состояние и т.д. Эти параметры учитываются, как правило, с помощью эмпирических коэффициентов.

Для емкостной модели электростатической системы рис. 3 зарядные и разрядные токи можно определить, используя формулы, полученные для напряжения  $u_C(t)$ :

$$i_{\text{зар}}(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}; \quad i_{\text{ут}}(t) = u_C(t) \cdot \frac{1}{R_{\text{ут}}};$$

$$i_{\text{кор}}(t) = u_C(t) \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{ут}}} + \frac{1}{R_{\text{к}}} \right); \quad i_{\text{искр}}(t) = u_C(t) \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{ут}}} + \frac{1}{R_{\text{к}}} + \frac{1}{R_{\text{и}}} \right).$$

График суммарного тока электростатической системы имеет вид, представленный на рис. 6.

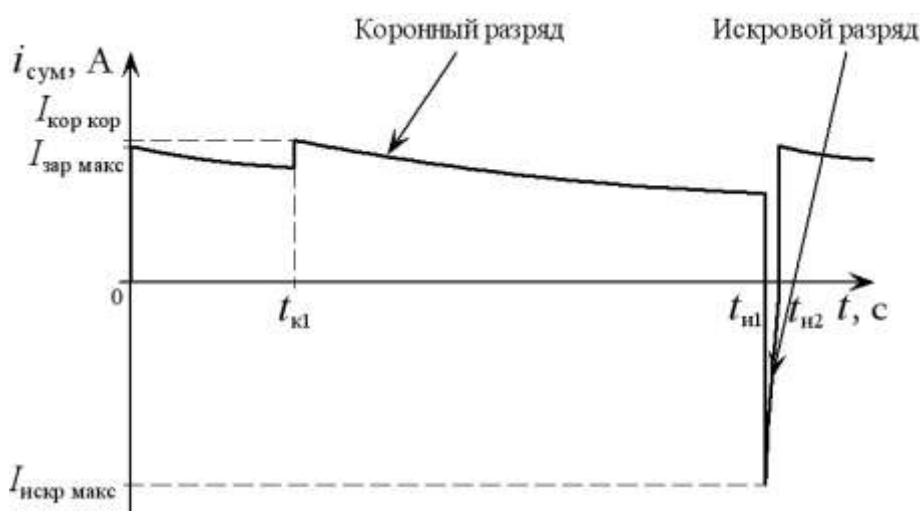


Рис. 6. График тока электростатической системы

График тока электростатической системы (рис. 6) представляет собой, практически, прямоугольный импульс очень большой амплитуды. При более детальном моделировании необходимо учитывать нелинейность сопротивлений  $R_{\text{ут}}$ ,  $R_{\text{к}}$  и  $R_{\text{и}}$ , изменение пороговых напряжений  $U_{\text{пор к}}$ ,  $U_{\text{пор и1}}$  и  $U_{\text{пор и2}}$ , значения которых зависят от состояния воздушных масс, окружающих ЛА (степени ионизации, температуры, влажности, загрязненности и т.д.).

Разложение в гармонический ряд Фурье последовательности прямоугольных импульсов будет представлять собой сумму четных гармоник, амплитуды которых обратно пропорциональны частоте. Частота первой гармоники бесконечного ряда Фурье ( $\omega_{(1)}$ ) определяется длительностью импульса тока, т.е.

$$\omega_{(1)} = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{t_{\text{и2}}}$$

Таким образом спектр помех, возникающих при наличии разрядных процессов электростатической системы охватывает диапазон частот от десятков герц до сотен килогерц, а с учетом нестабильности процессов, диапазон помех может быть еще шире.

## Влияние разрядных явлений статического электричества на работу бортового оборудования ЛА

Плотность напряженности электрического поля имеет максимальное значение на поверхностях корпуса летательного аппарата, имеющих минимальный радиус кривизны, т.е. на выступающих за пределы фюзеляжа штыревых элементах (антеннах, наружных элементах измерительных приборов) и на острых кромках крыльев, хвостового оперения.

В результате возникновения разрядов статического электричества на антенне, нагруженной на сопротивление  $R_n = 50$  Ом, в приемном тракте системы связи наводится импульсная помеха, напряжением  $U_{\text{пом}} = 0.5$  В. Импульсы помех имеют, как правило, хаотический характер, т.е. перекрывают спектр радиочастот приемника-передатчика ЛА (сотни мегагерц). Для приемников, чувствительность которых имеет порядок не хуже 1 мкВ, отношение сигнал/шум оказывается настолько велико, что работа приемника-передатчика становится неустойчивой.

Большие перегрузки, возникающие на входе приемника, могут привести к нелинейным искажениям входного сигнала. При этом возникновение явления кроссмодуляции, приводит к тому, что даже в диапазоне УКВ (частота модуляции около ста мегагерц) низкочастотные помехи вызывают срыв связи ЛА с наземными службами.

Последствиями наведения импульсных помех в трактах электронных сетей летательного аппарата проявляется также в сбое работы приборов, измеряющих высоту, скорость набегающего воздушного потока, неавтономных систем навигации, ошибки в работе которых, могут привести к возникновению аварийной ситуации и даже к катастрофе.

Для снижения влияния помех от разрядных явлений статического электричества на работу радиоэлектронных средств ЛА предпринимаются следующие специальные меры:

- устанавливаются разрядники на корпусе ЛА;
- создание системы экранизации электронных блоков ЛА;
- расположение антенн и приемных устройств забортовых измерительных приборов внутри фюзеляжа.

В настоящее время основным устройством для увеличения токов разряда самолета в полете являются острийные разрядники, устанавливаемые на законцовках крыльев и хвостового оперения, в местах наибольших значений напряженности электростатического поля. Назначением разрядников является не только уменьшение потенциала летательного аппарата, но и локализация источников помех в областях, максимально отдаленных от приемных антенн радиоаппаратуры.

Казалось бы, что увеличение числа разрядников в местах наибольшей концентрации электрического поля на корпусе ЛА должно приводить к увеличению токов разряда и, следовательно, к снижению электрического потенциала корпуса. Однако эффекты взаимного экранирования близко расположенных друг к другу острийных элементов, а также уменьшение напряженности электрического поля при неизбежном отдалении дополнительного разрядника от поверхности корпуса с минимальным уровнем кривизны поверх-

ности, существенно снижает эффективность использования большого количества разрядников.

Разрядники, помещенные в «электростатической тени», т.е. экранированные выступающими частями конструкций ЛА, например, размещенные на задней кромке крыла близко к фюзеляжу или на киле, на значительном удалении от его верхней точки, обладают весьма низкой эффективностью. В настоящее время эффективность острых разрядников достигла предельно возможного уровня.

Кроме использования острых разрядников на летательных аппаратах для снижения уровня помех используют такие меры, как размещения приемных антенн в местах, наиболее отдаленных от выступающих и заостренных деталей корпуса ЛА, помещение их внутри корпуса за прозрачными для излучения радиоволны окнами.

### Блок-схема системы использования статического электричества

Как отмечалось выше, статический потенциал возникает между двумя поверхностями, если хотя бы одна из них является диэлектриком. Для использования данного вида энергии необходимо создать систему передачи заряда на нагрузку. Основной сложностью при этом является отсутствие свободных носителей заряда в слое диэлектрика. Поэтому токосъемник, например, щеточного типа, должен иметь не точечный, а плоскостной характер контакта с заряженной поверхностью. Кроме того, величина потенциала не является величиной постоянной. График изменения статического потенциала на поверхности диэлектрика при равномерном взаимодействии этих поверхностей имеет вид, изображенный на рис. 2.

Выше уже отмечалось, что скорость нарастания потенциала и уровень напряжения пробоя не могут считаться стабильными величинами, их уровень зависит от свойств среды распространения разряда: влажности воздуха, уровня ионизации, температуры, наличия пыли и т.д.

Следовательно, система для использования статического электричества в качестве источника энергии, должна иметь систему стабилизации параметров электрического потенциала (управляемые разрядники). Блок-схема такого устройства изображена на рис. 2.

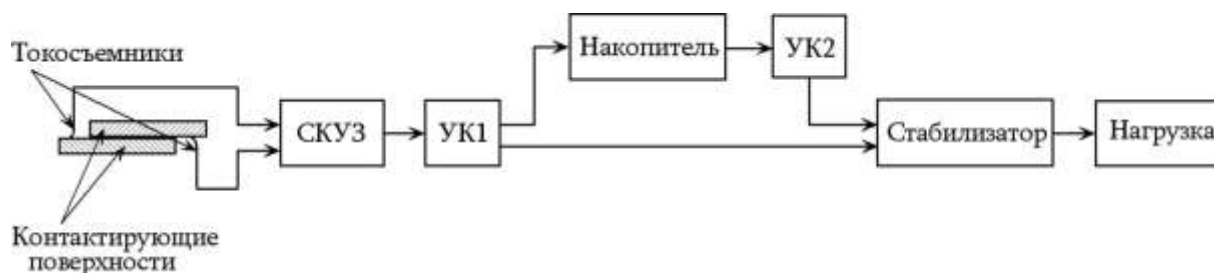


Рис. 2. Блок-схема устройства для использования статического электричества в качестве источника энергии

На рис. 2 обозначено: СКУЗ – схема контроля уровня заряда; УК1, УК2 – управляемые коммутаторы.

Токосъемники могут представлять собой, например, скользящие контакты щеточного типа, перемещение которых для снятия потенциала со всей поверхности заряженной плоскости, должно осуществляться за счет сторонних сил. Например, при снятии заряда с поверхности ленточного транспортера, неподвижные токосъемники контактируют с поверхностями вращающегося барабана и движущейся ленты.

Напряжение с токосъемников передается на схему контроля уровня заряда (СКУЗ), которая представляет собой ключевую схему, управляемую компаратором. Если статическая разность потенциалов меньше уровня, требуемого для обеспечения работы нагрузки, то управляемый коммутатор УК1 направляет электрическую энергию к накопителю емкостного или электрохимического типа. Питание нагрузки при этом осуществляется либо от этого накопителя, либо от еще одного внешнего источника энергии.

Если статическое напряжение имеет достаточный уровень для работы нагрузки в штатном режиме, то питание последней осуществляется через стабилизатор со схемы контроля уровня заряда.

Нужно заметить, что все системы статического электричества, в которых наблюдается пробой среды диэлектрика (разряд), можно разделить на два вида. Для первого характерно расположение противоположно заряженных слоев на расстоянии друг от друга, сравнимом с толщинами этих слоев. К этому типу относятся, например, электризующиеся поверхности разделяемых листов диэлектрика (бумаги, ткани, пластика). Для второго вида характерно расположение противоположно заряженных поверхностей на расстоянии друг от друга, существенно превышающем размеры этих поверхностей. Ко второму виду можно отнести, например, уединенную, т.е. расположенную на большом расстоянии от земной поверхности, заряженную сферу, причем, заряд земли принимается условно равным нулю. Такая картина наблюдается и при появлении статического заряда на корпусе летательного аппарата. В этом случае противоположно заряженной корпусу поверхностью можно считать ближайшую кромку облака или области воздушной массы отличающейся по структуре от окружающей корпус среды (область повышенного или пониженного давления, область повышенной влажности, загрязненности).

Уровень электризации тела зависит от многих факторов, следовательно, несмотря на то, что потенциал прямо пропорционален заряду, по одному потенциалу нельзя судить, насколько велик его заряд. Если при одном и том же заряде тела его удалять от земли или заземленных поверхностей, то емкость его будет уменьшаться, а потенциал возрастать.

## **Выводы**

Появление статического потенциала на поверхности тела может происходить при нарушении электростатического состояния в структуре диэлектрического слоя. Это может являться следствием множества факторов, таких, как, механический контакт двух поверхностей, изменение температуры, агрегатного состояния вещества, нарушение однородности электрического поля и т.д. Поэтому возможность использования статического электричества в качестве источника питания для маломощных электронных устройств натал-



квивается на проблемы, связанные с получением стабильных, предсказуемых значений разности потенциалов на заряженных поверхностях.

Создание модели электростатической системы является неотъемлемым этапом в процессе исследования явления возникновения статического потенциала на поверхности диэлектрического слоя. В представленной работе на базе емкостной модели электростатической системы, проведен расчет зарядно-разрядных явлений при взаимодействии корпуса летательного аппарата с набегающим воздушным потоком, построены графики переходных процессов, возникающих при этом. По результатам расчетов переходных процессов проведен анализ помех для бортовой радиоаппаратуры летательного аппарата, возникающих при появлении разрядных явлений электростатической системы «Летательный аппарат - Набегающий воздушный поток». В работе также проанализирована эффективность пассивных системы защиты летательных аппаратов от избыточного электростатического потенциала на корпусе, а также предложена блок-схема системы устройства для использования статического напряжения в качестве источника питания маломощных электронных устройств.

### Список литературы

1. Николаев М.Ю., Есимов А.М., Леонов В.В. Электрофильтры: принцип работы и основные достоинства // Технические науки - от теории к практике: ХLI Междунар. науч.-практич. конф. (Россия, г. Новосибирск, 24 декабря 2014 г.): Сб. статей. Новосиб.: СибАК, 2014. С. 59-65.
2. Санаев Ю.И. Электрофильтры: монтаж, наладка, испытание, эксплуатация. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1984. 25 с.
3. Мюллер Б., Пот У. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. 234 с. [Muller B., Poth U. Coatings formulation. Hannover: Vincentz, 2006. 290 p.].
4. Мельников И.В. Автомобиль: покраска и защита от коррозии. 2-е изд. Ростов н/Д.: Феникс, 2006. 287 с.
5. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник. 3-е изд. СПб.: Химиздат, 2008. 444 с.
6. Макаров Е.А., Усольцев Н. В. Твердотельная электроника : учеб. пособие. Новосиб.: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2004. 115 с.
7. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского гос. ун-та, 2004. 312 с.
8. Колпакчиев И. Волшебный ковер будущего // Техника - молодежи. 1969. № 7. С. 5-6.
9. Ситников А.В., Ситников И.А. Прикладная электроника: учебник. М.: КУРС: Инфра-М, 2017. 269 с.
10. Ситников А.В. Основы электротехники: учебник. М.: КУРС: Инфра-М, 2017. 288 с.

## Transients in Electrostatic Systems

A.V. Sitnikov<sup>1,\*</sup>, S.I. Maslennikova<sup>1</sup>

\* [sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** electrostatic potential; corona discharge; spark discharge; transients; discharge device

---

The phenomenon of electrification, i.e. the emerging static potential arises, when two substances with different work function of the charge carriers, i.e. with different atomic and molecular forces of charge attraction on the contact surface, come in contact. Upon contact of the two surfaces having stable electro-charged structure there is a redistribution of electrons and ions on the contact surfaces, with an electric double layer formed. This structure is typical for a capacitive component (plane capacitor).

A surface static charge may occur as a consequence of interaction between two bodies with different electrostatic characteristics and, as a result of exposing the body to the external energy (mechanical, thermal, radiation, etc.).

A high static potential emerging on the body of aircrafts may lead to an emergency situation on board and human electric shock hazard. The discharge phenomena of the electrostatic system running in an explosive environment are highly dangerous. To study the electrification processes is necessary when designing the protection systems of engineering devices and creating the systems, which use static electricity as a source of electric power.

The main parameters of electrostatic system are capacitance of the surface that acquires a charge, and also the threshold voltage values at which corona and spark breakdowns occur. The form of transients that occur in an electrostatic system with charge accumulation and discharge phenomena depends on these parameters.

The transient response of the electrostatic system can be calculated using a capacitive model. In the interaction of the aircraft with the oncoming airflow there is the body electrification due to charging currents. When the threshold voltage on the aircraft body is exceeded the corona and spark discharges occur. The highest density of the electromagnetic field takes place on the surfaces with a minimum radius of curvature. Therefore, corona and spark discharges are observed on the aircraft body components where there are protrusions and sharp edges. In this case the amplitude of pulse discharge current has a very high value.

The paper performs calculation of transients in the electrostatic system of the aircraft during the flight, analyzes the spectral content of impulse noise arising from discharge phenomena, draws conclusions that the higher-order harmonics of the noise spectrum overlap a range of the RF spectrum of the aircraft receiver-transmitter (hundreds of MHz). For high sensitivity receiv-

ers a signal/noise ratio is so great that the radio-equipment activity becomes unstable. High overload at the receiver input can lead to nonlinear distortions of the input signal in the range of modulation frequencies up to VHF range, thus leading to a failure in communication between the aircraft the ground services and a failure in non-autonomous navigation systems.

To reduce the impact of noise from discharge phenomena of static electricity on the running electronic equipment of the aircraft, there are special arresters, the efficiency of which depends on their design and location.

The technique the article proposes to calculate the transients emerging in an electrostatic system allows us to evaluate the spectral content of impulse noise occurring in the receiving and transmitting equipment of the aircraft and their amplitude and time-response characteristics thereby increasing the efficiency of noise protection.

## References

1. Nikolaev M.Yu., Esimov A.M., Leonov V.V. Elektrofil'try: printsip raboty i osnovnye dostoinstva [Cottrell: the working principle and the main advantages]. *Tekhnicheskie nauki: ot teorii k praktike* [Technical science - from theory to practice: XLI Intern. Scientific-Practical Conf. (Russia, Novosibirsk, December 24<sup>th</sup> 2014)]: Collection of articles. Novosibirsk: SibAK, 2014. Pp. 59-65 (in Russian).
2. Sanaev Yu. I. *Elektrofil'try: montazh, naladka, ispytanie, ekspluatatsiia* [Cottrell: installation, commissioning, testing, operation]. Moscow: TSINTIkhimneftemash Publ., 1984. 25 p. (in Russian).
3. Muller B., Poth U. *Coatings formulation*. Hannover: Vincentz, 2006. (Russ. ed.: Muller B., Poth U. *Lakokrasochnye materialy i pokrytiia. Printsipy sostavleniia retseptur*. Moscow: Paint-Media Publ., 2007. 234 p.).
4. Mel'nikov I.V. *Avtomobil': pokraska i zaschita ot korrozii* [Car: painting and corrosion protection]. 2<sup>nd</sup> ed. Rostov-na-Donu: Feniks Publ., 2006. 287 p. (in Russian).
5. Iakovlev A.D. *Khimiia i tekhnologiia lakokrasochnykh pokrytij* [Chemistry and technology of coatings]: a textbook. 3<sup>rd</sup> ed. S.-Petersburg: Khimizdat Publ., 2008. 444 p. (in Russian).
6. Makarov E.A., Usol'tsev N.V. *Tverdotel'naia elektronika* [Solid-state electronics]: a textbook. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical Univ. Publ., 2004. 115 p. (in Russian).
7. Gurtov V.A. *Tverdotel'naia elektronika* [Solid-state electronics]: a textbook. Petrozavodsk: Petrozavodsk State Univ. Publ., 2004. 312 p. (in Russian).
8. Kolpakchiev I. The magic carpet of the future. *Tekhnika – molodezhi* [Technics for the Youth], 1969, no. 7, pp. 5-6 (in Russian).
9. Sitnikov A.V., Sitnikov I.A. *Prikladnaia elektronika* [Applied electronics]: a textbook. Moscow: KURS Publ.: Infra-M Publ., 2017. 269 p. (in Russian).
10. Sitnikov A.V. *Osnovy elektrotekhniki* [Fundamentals of electrical engineering]: a textbook. Moscow: KURS Publ.: Infra-M Publ., 2017. 288 p. (in Russian).