

УДК 621.45.044

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА
С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСИ
В ПРОЦЕССЕ ИСКРОВОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ**

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН, И. Х. БАЙБУРИН

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ

Тел: (3472) 22 36 25 E-mail: ela_nt@mail.rb.ru

Анализируется один из возможных подходов к проектированию перспективных емкостных систем зажигания особого класса — систем аperiodического разряда, базирующийся на новых достижениях в области исследования воспламенения горючих смесей искровыми разрядами. Существо подхода состоит в совместном рассмотрении процессов воспламенения и стабилизации пламени в устройствах горения с учетом энергетических параметров искровых разрядов в свечах. Получено выражение для расчета емкости накопительного конденсатора системы зажигания аperiodического разряда по заданным параметрам топливовоздушной смеси в камере воспламенения

Емкостная система зажигания аperiodического разряда; воспламенение смеси; стабилизация пламени; параметры искровых разрядов; параметры потока смеси; расчет емкости накопительного конденсатора

В последние годы в УГАТУ на основе исследований закономерностей искрового воспламенения горючих смесей предложены и реализуются новые подходы к проектированию и оценке эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей. В основе новых подходов лежит разработанная обобщенная модель искрового воспламенения, позволившая установить критерии воспламеняющей способности систем зажигания и критерий электроискровой стабилизации пламени, соответствующий известному критерию Михельсона для стабилизации пламени плохо обтекаемыми телами [1]. Новые подходы к проектированию базируются также на совместном рассмотрении электрических процессов в разрядных цепях систем зажигания и газодинамических процессов воспламенения смеси и стабилизации пламени.

Существо новых подходов в проектировании заключается в применении установленных критериев воспламеняющей способности при различных способах стабилизации пламени, представляющих собой обобщенные параметры, однозначно определяющие, при прочих равных условиях, конечный результат процесса воспламенения. Возможны два пути использования критериев воспламеняющей способности при проектировании систем зажигания. Первый заключается в расчете параметров разрядных цепей по заданной величине критерия, определяемой на основании опытных данных в зависимости от условий воспламенения, или по известным качественным зависимостям величины критерия от предельно допустимых интегральных параметров топливовоздушной смеси, определяющих пусковые характе-

ристики воспламенителей и камер сгорания. Интегральным параметром смеси может быть, например, максимальная скорость потока смеси, при которой еще возможно воспламенение. Такой подход к расчету параметров проектируемых систем зажигания предложен и обоснован в работах [2, 3] соответственно для случаев электроискровой и аэродинамической стабилизации пламени в пусковых воспламенителях камер сгорания ГТД.

Суть второго подхода к проектированию с использованием критериев воспламеняющей способности состоит в применении известного условия электроискровой стабилизации пламени, связывающего параметры потока смеси с характеристиками системы зажигания, обеспечивающими надежную стабилизацию пламени. Расчетные возможности второго подхода на данном этапе являются ограниченными, поскольку рассматриваемое условие электроискровой стабилизации пламени описывает идеализированный случай воспламенения и распространения пламени в прямой цилиндрической камере без образования циркуляционной зоны, что характерно только для некоторых типов пусковых воспламенителей. Использование этого подхода позволяет в качественном плане представить сложнейшую взаимосвязь параметров систем зажигания с характеристиками смеси в процессе воспламенения и имеет хорошие перспективы, ориентированные, в конечном итоге, на значительное сокращение времени и материальных затрат на доводку систем воспламенения двигателей. Описанный подход реализован в работе [4] применительно к традиционным емкостным системам зажигания колебательного разряда, где обоснована возможность расчетного опре-

деления параметров систем зажигания по заданной скорости потока смеси в камере воспламенения, скорости распространения пламени и конструктивному параметру камеры.

В статье решается аналогичная задача исследования взаимосвязи параметров смеси в камере воспламенения с энергетическими параметрами разрядов в свечах емкостных систем зажигания особого класса — систем аperiodического разряда, которые выделяются в отдельную группу благодаря специфическим особенностям разрядных процессов.

Системы зажигания аperiodического разряда широко используются в зарубежных газотурбинных двигателях вследствие существенных преимуществ по сравнению с системами зажигания колебательного разряда. В отечественном двигателестроении в настоящее время эти системы не находят применения в силу ряда объективных причин, связанных с особенностями необходимой элементной базы, но относятся к перспективным и привлекают пристальное внимание специалистов. Наиболее эффективные схемы систем зажигания аperiodического разряда из числа новых отечественных разработок описаны в работе [5].

В ходе исследований приняты следующие основные допущения:

1. Анализируется процесс воспламенения ламинарного однородного потока смеси и стабилизации пламени в прямой цилиндрической камере без образования зоны обратных потоков.

2. Скорость потока и скорость распространения пламени постоянны во времени и по сечению камеры.

3. Не рассматриваются физико-химические свойства смеси, определяющие скорость распространения пламени.

Проанализируем известное условие электроискровой стабилизации пламени:

$$t_u \geq \frac{\left[\frac{1}{2f} \left(\frac{S^2}{V} - V \right) - l \right] V}{S(V_t - V)}, \quad (1)$$

где f — частота следования разрядных импульсов; t_u — длительность искровой стадии разряда в свече; S — скорость потока смеси; V — скорость распространения пламени; V_t — скорость пламени во время действия искрового разряда; l — длина камеры.

Наиболее неопределенной величиной в (1) является скорость распространения пламени во время действия источника зажигания V_t , которая зависит от параметров искровых разрядов. Как показано в работе [1], начальная скорость процесса воспламенения однозначно определяется значением критерия воспламеняющей способности систем зажигания в виде функции энергетических параметров, причем скорость развития процесса воспламенения обратно пропорциональна величине критерия воспламеняющей способности.

На основании результатов исследований, изложенных в [1, 4], запишем:

$$V_t - V = \frac{a}{K}, \quad (2)$$

где

$$K = \frac{W_{CB}}{I_m t_u W_0} \quad (3)$$

— критерий воспламеняющей способности систем зажигания применительно к электроискровому способу стабилизации пламени; W_{CB} — энергия искрового разряда в свече; I_m — амплитуда разрядного тока; W_0 — начальная энергия накопительного конденсатора в емкостной системе зажигания; a — коэффициент, учитывающий физико-химические свойства смеси.

В выражение для критерия K не входит частота следования разрядных импульсов, как это должно быть по результатам работы [1]; это отличие связано с тем, что частота следования разрядов учтена в условии электроискровой стабилизации пламени (1).

С учетом (2) преобразуем (1) к виду

$$\frac{K}{t_u} = \frac{a S_{\max}}{\left[\frac{1}{2f} \left(\frac{S_{\max}^2}{V} - V \right) - l \right] V}, \quad (4)$$

где S_{\max} — максимально допустимая скорость потока смеси, при которой еще возможна электроискровая стабилизация пламени.

Таким образом, отношение $\frac{K}{t_u}$, входящее в (4) и характеризующее систему зажигания, может быть рассчитано по следующим величинам: параметрам смеси S_{\max} , V , конструктивному параметру l и частоте разрядов в свече f . В то же время на основании (3) отношение $\frac{K}{t_u}$ запишется в виде

$$\frac{K}{t_u} = \frac{W_{CB}}{I_m t_u^2 W_0}. \quad (5)$$

Как показано в работе [6], величины I_m , t_u , W_{CB} , входящие в (5), зависят от параметров элементов разрядных цепей емкостной системы зажигания аperiodического разряда следующим образом:

$$I_m = \sqrt{\frac{C_H}{L}} (U_0 - bt_{nc}), \quad (6)$$

$$t_u = \frac{L_k}{R'} \ln \left(\frac{(U_0 - bt_{nc}) R'}{U_{L \min}} \sqrt{\frac{C_H}{L_k}} - \frac{\pi R}{4} \sqrt{\frac{C_H}{L_k}} \right), \quad (7)$$

$$W_{CB} = \frac{L_k}{R'} U_m I_m (1 - e^{-\frac{R'}{L_k} t_u}) + \frac{A I_m L_k^2}{R'^2} \left[\left(\frac{R'}{L_k} t_u + 1 \right) e^{-\frac{R'}{L_k} t_u} - 1 \right], \quad (8)$$

где C_H — емкость накопительного конденсатора; L — индуктивность разрядной цепи; L_k — индуктивность катушки, включенной последовательно

со свечой; $U_{L \min}$ — напряжение на катушке, при котором начинается гашение разряда; R — активное сопротивление разрядной цепи; R' — активное сопротивление цепи, состоящей из катушки индуктивности и свечи; b — коэффициент, зависящий от свойств полупроводниковой свечи; t_{nc} — длительность подготовительной стадии разряда в свече; $U_{ост}$ — остаточное напряжение на накопительном конденсаторе после погасания разряда; U_m — амплитудное значение падения напряжения в свече в течение искровой стадии разряда; A — коэффициент, зависящий от характера изменения падения напряжения в свече.

Подставив (6)–(8) в (5) и введя ряд расшифрованных ниже обозначений, получаем

$$\frac{K}{t_u} = \frac{B}{X^2 (\ln(MX))^2} \left\{ R'U_m \left(1 - \frac{1}{MX} \right) + AL \left[(\ln(MX) + 1) \frac{1}{MX} - 1 \right] \right\}, \quad (9)$$

где

$$B = \frac{2}{U_0^2 L}, \quad (10)$$

$$M = \left(\frac{(U_0 - bt_{nc})R'}{U_{L \min} \sqrt{L}} - \frac{\pi R}{4\sqrt{L}} \right), \quad (11)$$

$$\sqrt{C_H} = X. \quad (12)$$

Полученное выражение (9) является основой для приближенной оценки требуемой величины емкости накопительного конденсатора системы зажигания аperiodического разряда, исходя из заданного соотношения $\frac{K}{t_u}$, определяемого по (4).

Произведем в (9) следующую замену:

$$\ln(MX) = y. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (9), получим

$$\frac{K}{t_u} = BM^2 \frac{R'U_m \left(1 - \frac{1}{e^y} \right) + AL \left[(y + 1) \frac{1}{e^y} - 1 \right]}{e^{2y} y^2}. \quad (14)$$

Для решения (14) относительно y разложим e^y, e^{2y} в ряд Тейлора [7]:

$$\varphi(y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi^{(n)}(0)}{n!} y^n. \quad (15)$$

Находя последовательные производные от $\varphi(y) = e^y, e^{2y}$ и ограничиваясь первыми двумя членами ряда разложения, согласно (15) получим

$$e^y \approx 1 + y, \quad (16)$$

$$e^{2y} \approx 1 + 2y. \quad (17)$$

Подставляя (16) и (17) в (14) и проводя необходимые преобразования, будем иметь

$$2y^3 \frac{K}{t_u} + \frac{3}{2} y^2 \frac{K}{t_u} + y \frac{K}{t_u} - BM^2 R'U_m = 0. \quad (18)$$

Используя алгоритм решения кубических уравнений, изложенный в [8], запишем:

$$y = \sqrt[3]{\frac{1}{4} \left(\frac{BM^2 R'U_m}{(K/t_u)} + \sqrt{\frac{B^2 M^4 R'^2 U_m^2}{(K/t_u)^2} - \frac{1}{108}} \right)} + \sqrt[3]{\frac{1}{4} \left(\frac{BM^2 R'U_m}{(K/t_u)} - \sqrt{\frac{B^2 M^4 R'^2 U_m^2}{(K/t_u)^2} - \frac{1}{108}} \right)} - \frac{1}{2}. \quad (19)$$

С учетом введенных обозначений (12) и (13) искомая величина емкости накопительного конденсатора C_H будет равна

$$C_H = \frac{e^{2 \sqrt[3]{\frac{1}{4} \left(\frac{BM^2 R'U_m}{(K/t_u)} + \sqrt{\frac{B^2 M^4 R'^2 U_m^2}{(K/t_u)^2} - \frac{1}{108}} \right)}}}{M^2} \times \times e^{2 \sqrt[3]{\frac{1}{4} \left(\frac{BM^2 R'U_m}{(K/t_u)} - \sqrt{\frac{B^2 M^4 R'^2 U_m^2}{(K/t_u)^2} - \frac{1}{108}} \right)}} - 1, \quad (20)$$

где параметры B и M определяются по (10) и (11), а отношение $\frac{K}{t_u}$ рассчитывается по (4).

Полученная формула (20) для расчета емкости накопительного конденсатора позволяет в качественном плане анализировать взаимосвязь параметров систем зажигания аperiodического разряда с характеристиками смеси в процессе воспламенения. Возможности более точной количественной оценки параметров систем зажигания могут быть реализованы путем учета факторов, определяющих реальную динамику процессов в пусковых воспламенителях и камерах сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин Ф. А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в ГТД // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 56–60.
2. Гизатуллин Ф. А. О новом подходе к проектированию систем зажигания двигателей и энергетических установок // Электрификация и автоматизация сельского хозяйства: Межвуз. науч. сб. Уфа: БГАУ, 1999. Вып. 1. С. 76–81.
3. Гизатуллин Ф. А., Байбурун И. Х. Вопросы проектирования емкостных систем зажигания с учетом особенностей стабилизации пламени в камерах сгорания ГТД // Авиационная промышленность. 2000. № 2. С. 36–38.
4. Гизатуллин Ф. А., Краснов А. В. Об одном подходе к оценке параметров проектируемых систем зажигания газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 2. С. 25–27.
5. Гизатуллин Ф. А. Системы зажигания двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1998. 115 с.
6. Гизатуллин Ф. А. К теории разрядных процессов одного класса емкостных систем зажигания двигателей и энергетических установок // Электротехнические комплексы и системы управления ими: Межвуз. науч. сб. // Уфа: УГАТУ, 1998. С. 137–140.
7. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. М.: Наука, 1978. Т. 1. 456 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Под общей ред. И. Г. Арамановича. М.: Наука, 1973. 831 с.

ОБ АВТОРАХ

Гизатуллин Фарит Абдулганевич, профессор, зав. кафедрой электрооборудования ЛА и наземного транспорта УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1972), д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА, элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 1994). Исследования и разработки в области систем зажигания двигателей ЛА, воспламенения горючих смесей искровыми разрядами, цифровой диагностической аппаратуры для контроля параметров быстропротекающих импульсных процессов.



Байбурин Искандар Хамитович, аспирант той же кафедры. Дипл. инженер по электрооборудованию ЛА (УГАТУ, 1997). Готовит диссертацию по проектированию систем зажигания газотурбинных двигателей.

УДК 621.43.04.002.5.001

АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ АЗ2 СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

В. М. КУЛЯПИН

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ
Тел: (3472) 23 77 43

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов коммутации на высотах до 200 км. Определены особенности работы аппаратов и параметры катодных процессов электрических разрядов. Дано обоснование конструкции аппаратов защиты Аз2

Короткое замыкание; коммутация; аппарат; защита; кабина; космический корабль; разрежение; катодные процессы

ВВЕДЕНИЕ

Рост требований, предъявляемых к современным летательным аппаратам по высоте и скорости полета, ставит ряд сложных задач по обеспечению надежного функционирования элементов и устройств систем управления при изменении условий работы на всех режимах полета, включая аварийные. Статья посвящена рассмотрению процессов коммутации в аппаратах защиты систем управления космического корабля. Короткое замыкание представляет тяжелый режим, и защита от коротких замыканий является обязательным видом защит практически всех систем, чтобы предупредить тяжелые последствия, к которым могут привести возможные аварийные режимы, связанные с отказом отдельных элементов систем управления. Об этом свидетельствует гибель трех американских космонавтов из-за короткого замыкания в системе. Кроме обычных требований, предъявляемых к авиационному оборудованию, к аппаратам защиты космических кораблей предъявляются специальные требования по обеспечению работы при изменении давления окружающей среды от атмосферного до 10^{-4} Па. Необходимо выбрать метод надежного отключения токов короткого за-

мыкания. В статье разработана математическая модель и проведено моделирование процессов в области катодного падения потенциала, установлены источники энергии взаимосвязанных теплофизических и эмиссионных процессов, исследованы методы гашения электрических разрядов в вакууме и разработаны рекомендации по созданию аппаратов защиты и управления систем электропитания кабин космических кораблей.

Аномальное движение электрического разряда в вакууме открыто в начале века Штарком и Вейнтраубом и наблюдалось на всех подвергнутых испытанию металлах. Сущность явления заключается в том, что наблюдаемое при атмосферном давлении движение разряда под воздействием внешнего магнитного поля при повышении разрежения замедляется, а затем происходит изменение направления движения на обратное ожидаемому согласно правилу Ампера. Увеличение давления во всех случаях приводит к переходу направления движения в соответствии с законом Ампера.

Отсутствие экспериментальных исследований и слабая проработка теоретических вопросов не позволяли дать практические рекомендации по созданию аппаратов защиты для кабин космических кораблей [1].