

УДК 621.438.2
EDN: FFFQJM

PACS: 52.75.-d



Оценка параметров искровых разрядов и воспламеняющей способности емкостной системы зажигания с однополярными разрядными импульсами

Ф. А. Гизатуллин, З. Г. Габидуллина, Н. К. Потапчук

Разработан инструментарий для сравнительной теоретической оценки главного показателя эффективности перспективных емкостных систем зажигания с однополярными разрядными импульсами. Определены характеристики воспламеняющей способности по заданным фиксированным параметрам проектируемых и оцениваемых систем зажигания на основе критериев воспламеняющей способности применительно к неподвижной и движущейся топливовоздушным смесям в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Получены расчетные выражения для параметров однополярных искровых разрядов в полупроводниковых свечах – энергии, длительности разрядного тока, которые могут использоваться для анализа физических процессов на стадиях проектирования и исследования эффективности систем зажигания.

Ключевые слова: емкостная система зажигания, критерии воспламеняющей способности, полупроводниковая свеча, параметры искровых разрядов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-25-32

Введение

Различают несколько критериев оценки воспламеняющей способности систем зажигания газотурбинных двигателей [ГТД]. К ним относятся, в частности, площадь пусковой характеристики камер сгорания и пусковых воспламенителей, предельные значения скорости воздуха на входе в камеру сгорания, при которых еще возможно воспламенение, предель-

ные значения коэффициента избытка воздуха в первичной зоне камеры сгорания, минимальное давление среды, при котором возможно воспламенение, и другие. Интегральной характеристикой, определяющей процесс воспламенения топливовоздушной смеси искровыми разрядами, является соответствующая граница высотного запуска двигателей. Использование названных критериев предполагает испытания опытных или серийных образцов систем зажигания в условиях камер сгорания или пусковых воспламенителей реальных двигателей.

Возможности теоретической оценки и прогнозирования воспламеняющей способности систем зажигания достаточно ограничены. Считается, что воспламеняемость смеси повышается при увеличении энергии и мощности искровых разрядов, однако, есть исследования, опровергающие общепринятые представления, увеличение энергии и мощности искровых разрядов может ухудшать процесс воспламенения [1, 2].

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, гл.н.с., д.т.н.

E-mail: elaint@yandex.ru

Габидуллина Зульфия Газинуровна, доцент, к.т.н.

E-mail: gabidullina.zg@ugatu.su

Потапчук Николай Константинович, вед. инженер, к.т.н.

E-mail: nkp2049948@mail.ru

НИИ «ЭТКиС» ПИШ «Моторы будущего» УУНиТ.
Россия, 450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12, корп. 4.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023

После доработки 12.03.2023

Принята к публикации 22.03.2023

© Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г., Потапчук Н. К., 2023

В работе [3] приведен алгоритм приближенной оценки воспламеняющей способности классической емкостной системы зажигания колебательного разряда на основе использования установленного в [2] критерия воспламеняющей способности искровых разрядов. Для решения этой задачи проведено моделирование разрядных процессов с учетом нелинейных свойств полупроводниковых свечей. Подобная задача для систем зажигания с однополярными разрядными импульсами не решалась.

Постановка задачи и решение

В статье решается задача теоретической оценки параметров искровых разрядов и воспламеняющей способности перспективных емкостных систем зажигания с однополярными разрядными импульсами (систем зажигания аperiodического разряда). Такие системы зажигания в настоящее время для отечественных двигателей серийно не выпускаются, однако, работы по их созданию ведутся интенсивно. В литературе признано, что аperiodический разрядный процесс по эффективности превосходит стандартный колебательный разряд в силу следующих причин.

Во-первых, при аperiodическом разряде, получаемом искусственно путем шунтирования катушки индуктивности и полупроводниковой свечи обратным включенным высоковольтным диодом, выше энергетическая эффективность, оцениваемая отношением энергии разряда в свече к энергии накопительного конденсатора. Во-вторых, выше срок службы высоковольтного накопительного конденсатора, так как напряжение на конденсаторе не меняет знака. В-третьих, существенным преимуществом является большая величина плазменного выброса в полупроводниковых свечах открытого и полузакрытого типов за счет того, что электродинамическая сила, действующая на искровой разряд, не меняет знака; соответственно, выше воспламеняющая способность аperiodических разрядов по сравнению с колебательными.

Теоретическую сравнительную оценку воспламеняющей способности системы зажигания с однополярным импульсом проведем на основе критериев воспламеняющей спо-

собности емкостных систем зажигания, установленных в работах [2, 3] применительно к воспламенению неподвижной топливовоздушной смеси и смеси, движущейся с высокой скоростью.

Случай практически неподвижной смеси в камере сгорания ГТД соответствует условиям наземного запуска двигателя, когда рабочий торец свечи зажигания располагается на границе циркуляционной зоны, т. е. на границе разделения прямых и обратных потоков смеси, где скорость потока теоретически равна нулю. При высотном запуске двигателя условия в зоне расположения свечи меняются кардинально. Циркуляционная зона в камере сгорания сужается и рабочий торец свечи оказывается в зоне высоких скоростей потока. Смещение границы циркуляционной зоны и повышение скорости потока в зоне искрообразования в свече значительно ухудшают условия воспламенения и являются одним из основных факторов, ограничивающих высотность запуска газотурбинных двигателей. При высокой скорости потока смеси распространение пламени на первичную зону камеры сгорания, т. е. аэродинамическая стабилизация пламени, возможно только в случае, если ядро пламени, образованное искровым разрядом в свече вне циркуляционной зоны, войдет в контакт с границей этой зоны при движении в области прямых потоков.

Для неподвижной топливовоздушной смеси критерий воспламеняющей способности емкостных систем зажигания, как функция параметров систем зажигания, однозначно определяющий процесс искрового воспламенения, определен в виде [2]:

$$K = \frac{I_m t_n}{\sqrt[n]{f \cdot W_0 \cdot W_{св}}}, \quad (1)$$

где I_m – максимальное значение разрядного тока; t_n – длительность искровой стадии разрядов в полупроводниковой свече; f – частота следования разрядов в свече; n – параметр, зависящий от аэродинамических свойств камеры сгорания; $W_{св}$ – энергия разрядов в свече; $W_0 = \frac{C_n \cdot U_0^2}{2}$ – начальная энергия накопительного конденсатора; C_n – емкость накопительного конденсатора; U_0 – начальное напряжение на конденсаторе.

В работах [2, 3] доказано, что для повышения воспламеняющей способности системы зажигания при воспламенении неподвижной смеси необходимо минимизировать критерий, определяемый выражением (1).

Критерий воспламеняющей способности емкостной системы зажигания при высокой скорости поток смеси получен в [2, 3] в виде:

$$K_1 = \frac{W_{св}}{fW_0 I_m t_{и}}. \quad (2)$$

В соответствии с результатами работ [2, 3] к повышению воспламеняющей способности емкостных систем зажигания при высокой скорости потока смеси приводит минимизация критерия K_1 (2).

Сравнение критериев K и K_1 , определяемых соотношениями (1) и (2), показывает, что критерий воспламеняющей способности применительно к движущейся смеси принципиально отличается от критерия для неподвижной смеси. Различия в критериях, как показано в [2, 3], обусловлены преобладанием теплового или цепного механизмов воспламенения в зависимости от скорости потока смеси в зоне искровых разрядов в свечах зажигания.

Для получения зависимостей параметров искровых разрядов $W_{св}$, I_m , $t_{и}$, входящих в выражения для критериев K и K_1 , от параметров разрядных цепей системы зажигания с однополярным разрядным импульсом проанализируем упрощенную схемотехнику таких систем зажигания и осциллограммы разрядных процессов. Схема для получения однополярного импульса показана на рис. 1, на рис. 2 представлены характерные осциллограммы.

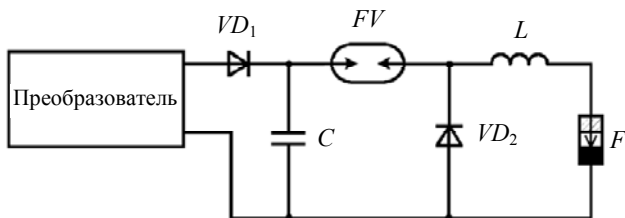


Рис. 1. Принципиальная схема системы зажигания аperiodического разряда

В схеме на рис. 1 аperiodический разряд обусловлен не определенным сочетанием параметров R , L и C в классической схеме емкостной системы зажигания, а искусственно

создается в схеме с большой индуктивностью разрядной цепи благодаря подключению дополнительного элемента – высоковольтного диода VD_2 .

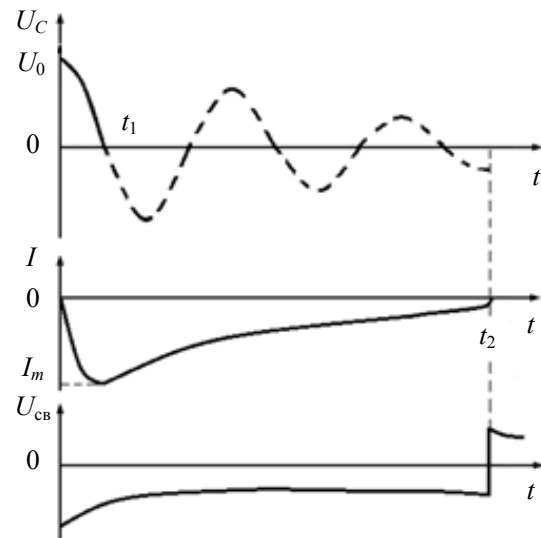


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе, разрядного тока и падения напряжения в свече

На осциллограммах пунктиром показан характер кривой $U_C(t)$ при отсутствии диода VD_2 . Высоковольтный диод VD_2 не влияет на разрядные процессы в течение первой четверти периода изменения напряжения на конденсаторе. В момент времени t_1 , когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю, разрядный ток достигает максимума. Это означает, что вся энергия накопительного конденсатора перешла в энергию магнитного поля катушки индуктивности. Далее, энергия магнитного поля реализуется при протекании аperiodически изменяющегося тока в контуре, образованном индуктивностью, свечой и высоковольтным диодом.

Полупроводниковая свеча F на рис. 1 является нелинейным элементом разрядной цепи с падающей вольтамперной характеристикой. Учет нелинейности свечи при описании параметров разрядов $W_{св}$, I_m , $t_{и}$ возможен разными способами. Первый способ заключается в описании реальных динамических вольтамперных характеристик свечи с последующим переходом к временным зависимостям через закон изменения разрядного тока. Этот способ, реализованный в [4], осложняется неоднозначностью вольтамперных характеристик при изменении параметров разрядной

цепи, а также отсутствием этой информации для серийных полупроводниковых свечей. Второй способ учета нелинейности свечи состоит в аналитическом описании усредненных кривых падения напряжения в свече и разрядного тока, полученных экспериментально.

В работах [5–9] моделирование разрядных процессов, в том числе, аналитическое описание разрядного тока и падения напряжения в полупроводниковой свече осуществлялось при достаточно грубых допущениях. В частности, в [5] падение напряжения в свече в течение второго этапа разрядного процесса после времени t_1 на рис. 1 считалось постоянным, для разрядного тока на первом и втором этапах разрядного процесса (до и после времени t_1 на рис. 1) решения для тока получены при условии, что коммутирующий разрядник FV представляет собой идеальный ключ с нулевыми потерями. В работах [3, 6] падение напряжения в свече аппроксимировано линейной убывающей функцией, что является весьма грубым приближением.

При описании разрядных процессов в схеме на рис. 1 используем следующий подход.

Представим кривую разрядного тока в виде суммы двух экспонент равной амплитуды и противоположных по знаку:

$$i(t) = F(e^{-\alpha_1 t} + e^{-\alpha_2 t}), \quad (3)$$

$$\text{где } F = \frac{I_m}{e^{-\alpha_1 t_1} + e^{-\alpha_2 t_1}}; \quad \alpha_1 = \frac{R'}{L}; \quad (4)$$

α_2 находится из условия:

$$\alpha_1 \cdot e^{-\alpha_1 t_1} = \alpha_2 \cdot e^{-\alpha_2 t_1}, \quad (5)$$

где I_m – максимальное значение разрядного тока; R' – активное сопротивление цепи, состоящей из катушки индуктивности и свечи; L – полная индуктивность разрядной цепи, включающая индуктивность катушки.

Первое слагаемое в формуле (3), т. е. $F \cdot e^{-\alpha_1 t}$, учитывает нелинейность разрядника и свечи на первом этапе разрядного процесса, второе слагаемое учитывает нелинейность только свечи, т. к. на втором этапе разрядного процесса ток через разрядник не протекает.

Получить аналитически решение для величины α_2 из условия (5) невозможно, для

решения этой задачи необходимо применение численных методов расчета; при использовании ЭВМ эта задача может быть решена с помощью специализированных математических программных оболочек (*MathCad*, *MATHLAB* и др.). Разлагая экспоненту в выражении (5) в ряд Тейлора и ограничиваясь первыми тремя членами разложения, найдем первое приближение для величины α_2 :

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \frac{2}{t_1} + \frac{2}{\alpha_1 \cdot t_1^2}. \quad (6)$$

Точное значение α_2 находится с использованием программы *MathCad*.

Выражение для амплитудного значения разрядного тока I_m , входящее в (1), (2) и (3), найдем с учетом того, что в интервале изменения времени от 0 до t_1 на рис. 1 высоковольтный диод VD_2 не влияет на разрядные процессы и разрядный ток меняется по закону, справедливому при разряде конденсатора на цепь $R-L$. В этом случае в соответствии с [3] и пренебрегая подготовительной стадией разряда в полупроводниковой свече, запишем:

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C_H}{L}}. \quad (7)$$

Получим выражение для длительности искровой стадии разрядов $t_{и}$.

Апериодический разрядный процесс может быть представлен состоящим из двух этапов. Первый этап характеризует процесс разряда накопительного конденсатора до момента времени t_1 ; второй этап представляет собой изменение разрядного тока от момента t_1 до значения тока, при котором происходит гашение разряда. Таким образом, полная длительность искровой стадии разряда

$$t_{и} = t_1 + t_2. \quad (8)$$

Длительность разряда можно рассчитать, взяв за основу известное выражение для напряжения на катушке индуктивности, получаемое при решении системы уравнений для схемы замещения разрядной цепи [6]:

$$U_L = \frac{U_0 R' \sin \theta}{\omega L \sqrt{\left(\frac{R'}{\omega_0 L_k}\right)^2 + \frac{2R'}{\omega_0 L_k} \cos \theta + 1}} e^{\left[-\frac{R}{2L} t_1 + \frac{R'}{L_k} t\right]}, \quad (9)$$

где R – эквивалентное активное сопротивление всей разрядной цепи; L_k – индуктивность катушки; $U_{и}$ – напряжение на конденсаторе к началу искровой стадии разряда;

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \delta = \frac{R}{2L}, \quad (10)$$

$$\theta = \arctg\left(-\frac{\omega}{\delta}\right).$$

Подставляя в (9) вместо U_L значение напряжения на катушке индуктивности $U_{L \min}$, при котором начинается гашение разряда, а вместо текущего времени t длительность второго этапа разрядного процесса t_2 , после преобразований получим:

$$t_2 = \frac{L_k}{R'} \ln \times \left[\frac{U_0 R' \sin \theta e^{-\frac{R}{2L} t_1}}{\omega_0 L U_{L \min} \sqrt{\left(\frac{R'}{\omega_0 L_k}\right)^2 + \frac{2R'}{\omega_0 L_k} \cos \theta + 1}} \right]. \quad (11)$$

Упрощённое выражение для t_2 можно получить, учитывая, что для разрядной цепи с катушкой индуктивности справедливо

$$\omega_0 > \delta; \quad L \approx L_k.$$

Отсюда следует:

$$\theta \approx \pi/2, \quad \omega \approx \omega_0. \quad (12)$$

Тогда на основании (11) с учетом (12) можно записать:

$$t_2 \approx \frac{L_k}{R'} \ln \left[\frac{U_0 R' e^{-\frac{R}{2L_k} t_1}}{U_{L \min} \sqrt{\frac{L_k}{C}} \sqrt{\left(\frac{R'}{\omega_0 L_k}\right)^2 + 1}} \right]. \quad (13)$$

Для длительности первого этапа разрядного процесса справедливо [3]

$$t_1 \approx \frac{\pi}{2} \sqrt{L_k C}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13) после преобразований с учетом того, что длительность первого этапа разряда значительно меньше длительности второго этапа, получим

$$t_{и} \approx \frac{L_k}{R'} \ln \left(\frac{U_0 R'}{U_{L \min}} \sqrt{\frac{C}{L_k}} - \frac{\pi R}{4} \sqrt{\frac{C}{L_k}} \right). \quad (15)$$

На основе анализа большого массива экспериментальных данных кривую падения напряжения в свече будем аппроксимировать зависимостью вида

$$u(t) = U_m - A \cdot t - B \cdot \sin(\beta \cdot t), \quad (16)$$

где U_m – максимальное значение падение напряжения в свече; $\beta = \frac{\pi}{t_{и}}$; A, B – коэффициенты, определяемые из типичных осциллограмм падения напряжения в свече следующим образом:

$$A = \frac{U_m - U(t_{и})}{t_{и}}, \quad (17)$$

где $U(t_{и})$ – падение напряжения в свече, соответствующее окончанию искрового разряда; $t_{и}$ – длительность разряда;

$$B = U_m - \frac{A \cdot t_{и}}{2}. \quad (18)$$

Энергию искровых разрядов в полупроводниковой свече определим на основании известной энергетической формулы:

$$W = \int_0^{t_{и}} u \cdot i \cdot dt, \quad (19)$$

где u, i – мгновенные значения падения напряжения в искровом разряде и разрядного тока.

Подставив (3) и (16) в (19), интегрируя и проведя соответствующие преобразования в окончательном виде будем иметь:

$$W = F \cdot \left\{ \begin{aligned} &U_m \cdot \left(\frac{1}{R/L} - \frac{1}{\alpha_2} \right) + A \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{1}{(R/L)^2} \right) + \\ &+ \beta \cdot B \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2^2 + \beta^2} - \frac{1}{(R/L)^2 + \beta^2} \right) + \\ &+ e^{-\frac{R}{L} t_n} \cdot \left(-\frac{U_m}{R/L} + \frac{A}{(R/L)^2} + \frac{A \cdot t_n}{R/L} - \frac{\beta \cdot B}{(R/L)^2 + \beta^2} \right) - \\ &- e^{-\alpha_2 t_n} \cdot \left(-\frac{U_m}{\alpha_2} + \frac{A}{\alpha_2^2} + \frac{A \cdot t_n}{\alpha_2} - \frac{\beta \cdot B}{\alpha_2^2 + \beta^2} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

Полученные выражения для параметров апериодических искровых разрядов в полупроводниковых свечах I_m , t_n , W могут использоваться при разработке методик проектирования и оценки эффективности перспективных емкостных систем зажигания апериодического разряда. Точность расчетного определения названных параметров искровых разрядов в полупроводниковых свечах подтверждена экспериментально в ходе осциллографических исследований разрядных процессов в макетном образце системы зажигания апериодического разряда по принципиальной схеме на рис. 1. Методика осциллографирования описана в работе [7]. Параметры I_m и t_n определялись непосредственно из осциллограмм, а энергия искровых разрядов рассчитывалась по осциллограммам разрядного тока и падения напряжения в серийной полупроводниковой свече методом графического перемножения мгновенных значений тока и падения напряжения в свече с последующим

графическим интегрированием построенной кривой мгновенной мощности по соотношению (19). На рис. 3 показаны зависимости $W = f(L_k, C)$, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле (20). Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 12 %, что вполне приемлемо при оценке параметров быстротекущих импульсных разрядных процессов. При подстановке найденных выражений для параметров I_m , t_n , W (7), (15) и (20) в формулы для расчетного определения критериев воспламеняющей способности емкостных систем зажигания K (1) и K_1 (2) соответственно для неподвижной и движущейся топливовоздушных смесей, получаются аналитические выражения для сравнительной теоретической оценки воспламеняющей способности систем зажигания апериодического разряда. Как показано выше, воспламеняющая способность повышается при минимизации критериев K и K_1 .

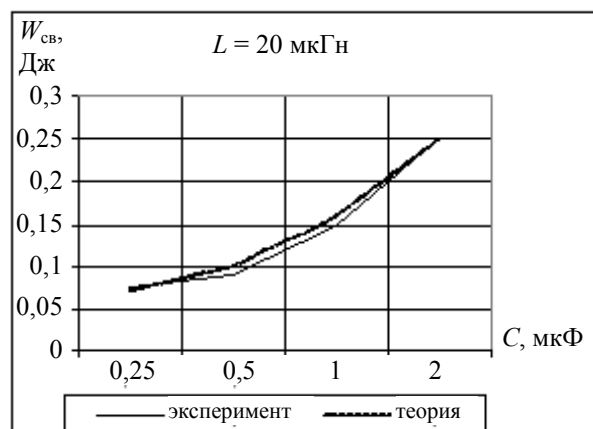
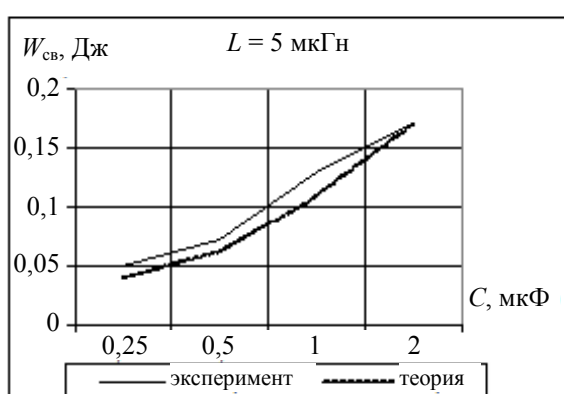


Рис. 3. Зависимости $W = f(L_k, C)$

Заключение

Таким образом, в результате решения поставленной задачи разработан инструмент для сравнительной теоретической оценки главного показателя эффективности перспективных емкостных систем зажигания с однополярными разрядными импульсами – воспламеняющей способности по заданным фиксированным параметрам проектируемых и оцениваемых систем зажигания. Полученные расчетные выражения для параметров аperiодических искровых разрядов – энергии, длительности и разрядного тока могут использоваться в процессе проектирования систем зажигания и для анализа разрядных процессов без проведения сложных и трудоемких экспериментальных исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00713, <https://rscf.ru/project/23-29-00713/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986.
2. *Гизатуллин Ф. А.* / *Авиационная промышленность*. 2000. № 1. С. 56–60.
3. *Гизатуллин Ф. А.* Емкостные системы зажигания. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2002.
4. *Гизатуллин Ф. А., Каримова А. Г.* / *Известия вузов. Электромеханика*. 2017. Т. 60. № 4. С. 50–55.
5. *Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г.* / *Вестник УГАТУ*. 2009. Т. 12. № 2. С. 126–133.
6. *Гизатуллин Ф. А.* К теории разрядных процессов одного класса емкостных систем зажигания двигателей и энергетических установок / *Электротехнические комплексы и системы управления ими: Межвуз. научн. сб.* – Уфа, УГАТУ. 1998. С. 137–140.
7. *Габидуллина З. Г.* Исследование разрядных процессов в емкостных системах зажигания: Дис. ... канд. техн. наук: – Уфа, УГАТУ, 2009.
8. *Bassam Hanna, Habib Bassam.* / *Chemical Engineering & Technology*. 2015. Vol. 33. P. 1299.
9. *Song K., Gao Z. Y., Liao J. B.* / *Journal of System Simulation*. 2008. Vol. 18. № 057. P. 4991–4997. DOI: 10.2174/1874129001509010193.

PACS: 52.75.-d

On the estimation of the parameters of spark discharges and the ignition ability of a capacitive ignition system with unipolar discharge pulses

F. A. Gizatullin, Z. G. Gabidullina and N. K. Potapchuk

Ufa University of Science and Technology
Bd. 4, 12 Karl Marx st., Ufa, 450000, Russia
E-mail: elaint@yandex.ru, gabidullina.zg@ugatu.su, nkp2049948@mail.ru

Received 20.02.2023; revised 12.03.2023; accepted 22.03.2023

A toolkit has been developed for a comparative theoretical assessment of the main indicator of the efficiency of promising capacitive ignition systems with unipolar discharge pulses – igniting ability according to given fixed parameters of designed and evaluated ignition systems based on the igniting ability criteria in relation to stationary and moving air-fuel mixtures in the combustion chambers of gas turbine engines. Calculation expressions are obtained for the parameters of unipolar spark discharges in semiconductor candles – energy, duration and discharge current, which can be used to analyze discharge processes at the design stages and study the efficiency of ignition systems.

Keywords: capacitive ignition system, flammability criteria, semiconductor spark plug, spark discharge parameters.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-25-32

REFERENCES

1. Lefevr A., Processes in gas turbine engine combustion chambers, Moscow, Mir, 1986.
2. Gizatullin F. A., Aviation industry, № 1, 56–60 (2000).
3. Gizatullin F. A., Capacitive ignition systems, Ufa, Ufa state aviation technical university, 2002.
4. Gizatullin F. A. and Karimova A. G., Izvestiya vuzov. Electromechanics **60** (4), 50–55 (2017).
5. Gizatullin F. A. and Gabidullina Z. G., Vestnik USATU **12** (2), 126–133 (2009).
6. Gizatullin F. A., On the theory of discharge processes of one class of capacitive ignition systems for engines and power plants, Electrotechnical complexes and control systems for them. Ufa, USATU, 1998, pp. 137–140.
7. Gabidullina Z. G., Research of discharge processes in capacitive ignition systems: Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Ufa, USATU, 2009.
8. Bassam Hanna and Habib Bassam, Chemical Engineering & Technology **33**, 1299 (2015).
9. Song K., Gao Z. Y. and Liao J. B., Journal of System Simulation **18** (057), 4991–4997 (2008).
DOI: 10.2174/1874129001509010193.