
УДК 621.43.044.

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ В ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМАХ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

© 2024 г. Ф. А. Гизатуллин^{1, *}, О. А. Юшкова^{1, **}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Уфимский университет науки и технологий”, Уфа, Россия

*e-mail: elaint@yandex.ru,

**e-mail: yushkova-usatu@bk.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 12.11.2024 г.

Представлены результаты расчетного определения вероятностных параметров искровых разрядов в полупроводниковых свечах емкостных систем зажигания — энергии и длительности разрядов, разрядного тока и критерия воспламеняющей способности систем зажигания по измерениям двух диагностических величин при невозможности прямого измерения названных параметров в условиях газотурбинных двигателей и натурных испытательных стендов. В качестве диагностических параметров приняты измеряемые легкодоступными средствами два напряжения на накопительном конденсаторе систем зажигания — напряжение при переходе подготовительной стадии разрядов в искровую и напряжение на конденсаторе после погасания разряда в полупроводниковой свече. Экспериментально определены законы распределения диагностических величин, с использованием методов теории вероятностей получены выражения для числовых характеристик параметров разрядов в функции диагностических величин и характеристик элементов разрядных цепей систем зажигания.

Ключевые слова: емкостная система зажигания, диагностический параметр, параметр искровых разрядов

DOI: 10.31857/S0002331024060062

Основными показателями эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей являются воспламеняющая способность, энергетическая эффективность и надежность работы. Воспламеняющая способность, как основной показатель эффективности, может быть оценена разными способами, например, по площади пусковой характеристики камеры сгорания или воспламенителя, по максимальной высоте, при которой возможен повторный запуск в полете после выключения двигателя, по предельным значениям скорости воздуха на входе в камеру сгорания для

успешного воспламенения топливовоздушной смеси и другие [1]. В работах [2, 3] показано, что ни один из основных параметров искровых разрядов в свечах зажигания — энергия, разрядный ток, длительность разрядов, не определяет однозначно воспламеняющую способность системы зажигания. В работе [3] на основе разработанной обобщенной модели искрового воспламенения, примилившей противоречия известных тепловых и нетепловых теорий воспламенения, установлены критерий воспламеняющей способности искровых разрядов в свечах, критерий воспламеняющей способности применительно к системе зажигания в целом и критерий электроискровой стабилизации пламени в камерах сгорания или пусковых воспламенителях, аналогичный известному критерию Михельсона для стабилизации пламени плохообтекаемыми телами. Функционал критерия воспламеняющей способности искровых разрядов зависит от того, какая топливовоздушная смесь воспламеняется — движущаяся или неподвижная. Динамика газодинамических процессов в камерах сгорания такова, что при наземном, т.е. стартовом запуске ГТД, воспламеняется практически неподвижная смесь, так как рабочий торец свечи в месте образования искровых разрядов располагается на границе циркуляционной зоны, т.е. на границе разделения прямых и обратных потоков, где скорость потока теоретически равна нулю. При высотных запусках двигателя граница зоны обратных потоков смещается и рабочий торец свечи оказывается в зоне высоких прямых скоростей потока.

Для случая движущейся топливовоздушной смеси, как наиболее сложно воспламеняемой, критерий воспламеняющей способности емкостных систем зажигания получен в виде [2, 3]:

$$K = \frac{W}{I_m t_{\text{и}} W_0 f}, \quad (1)$$

где W — энергия искрового разряда в свече; I_m — максимальное значение разрядного тока; $t_{\text{и}}$ — длительность искровой стадии разряда в свече; $W_0 = \frac{CU_0^2}{2}$ — энергия накопительного конденсатора; C — емкость накопительного конденсатора; U_0 — напряжение заряда накопительного конденсатора; f — частота следования разрядов в свече.

В работах [2, 3] доказано, что для повышения воспламеняющей способности системы зажигания необходимо минимизировать величину критерия K .

По поводу параметров искровых разрядов W , I_m , $t_{\text{и}}$, входящих в (1), необходимо отметить следующее. Названные параметры взаимосвязаны таким образом, что при фиксированных энергии накопительного конденсатора W_0 и частоте следования разрядов в свече f минимизация критерия K приводит к увеличению энергии искровых разрядов в свече W при непропорциональном увеличении длительности искровой стадии разрядов $t_{\text{и}}$ и уменьшению максимального значения разрядного тока I_m . Наиболее неопределенной величиной в (1) является энергия искровых разрядов, которая определяется известной интегральной формулой:

$$W = \int_0^{t_{\text{и}}} u i dt, \quad (2)$$

где u , i — мгновенные значения напряжения в разряде и тока в течение разрядного процесса.

В камере сгорания газотурбинного двигателя искровой разряд в свече зажигания подвергается широкому кругу возмущающих воздействий (температура, давление, поток топливовоздушной смеси). В [4] получено, что в течение цикла запуска ГТД случайным образом от разряда к разряду изменяются все основные параметры искровых разрядов, определяющие эффективность системы зажигания. При выходе этих параметров за пределы допусковых областей воспламенения не происходит. Кроме того, в процессе эксплуатации системы зажигания изменяются характеристики полупроводниковой свечи, увеличивается междуэлектродный зазор, меняются свойства полупроводящего слоя. В результате основные выходные параметры системы зажигания, т.е. энергия, длительность разрядов и амплитуда разрядного тока тоже изменяются. Это приводит к снижению эффективности системы зажигания, оцениваемой ее воспламеняющей способностью и надежностью при параметрических отказах.

В качестве примера на рис. 1(а, б) приведены характерные временные зависимости напряжения на накопительном конденсаторе емкостной системы зажигания в течение одного цикла запуска двигателя [4]. Рис. 1а соответствует началу запуска двигателя, когда подача топлива еще не включена и свеча работает в потоке воздуха; рис. 1б соответствует работе свечи при воздействии топливовоздушной смеси.

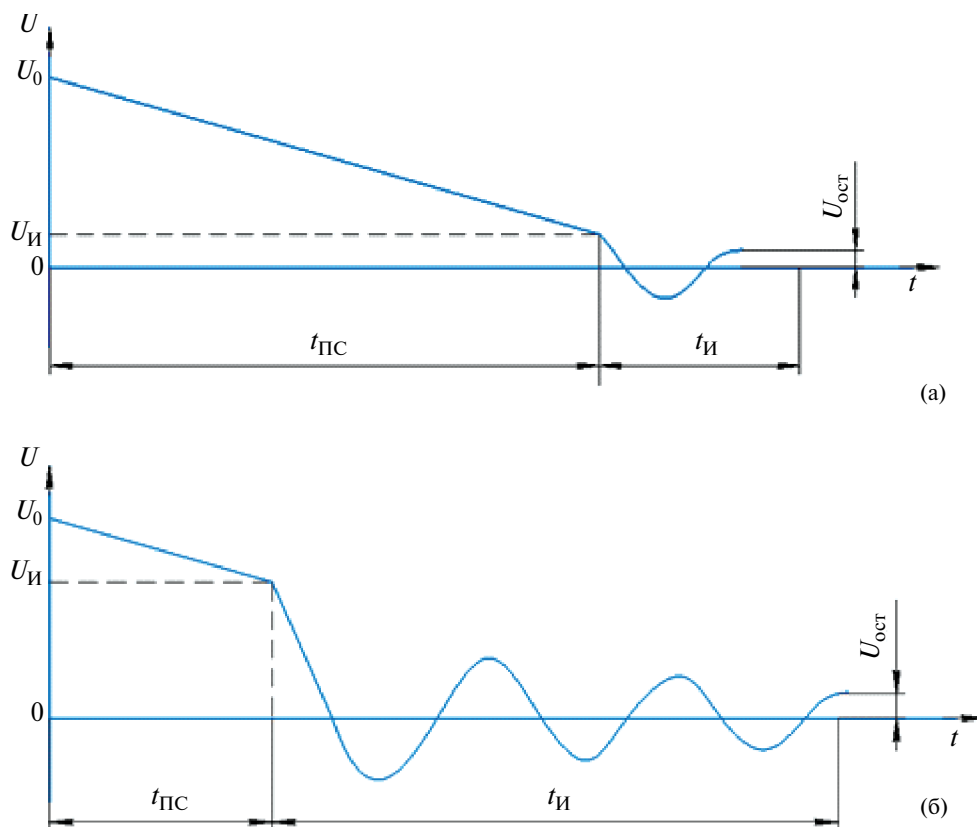


Рис. 1. Характерные временные зависимости напряжения на накопительном конденсаторе: (а) при работе свечи в воздухе; (б) при работе свечи при воздействии топливовоздушной смеси.

На рис. 1 (а, б) обозначено: $t_{\text{ПС}}$ – длительность подготовительной стадии разряда; $U_{\text{и}}$ – напряжение на накопительном конденсаторе в момент перехода подготовительной стадии разряда в искровую; $U_{\text{ОСТ}}$ – остаточное напряжение на конденсаторе после погасания разряда. Сравнение осциллограмм показывает, что величина $t_{\text{ПС}}$ может меняться кратно, нестабильным остается и параметр $U_{\text{ОСТ}}$.

Достоверные представления о вероятностных параметрах разрядов в свечах можно получить только в результате натурных испытаний. Однако для того, чтобы определить по ним все необходимые величины, характеризующие эффективность системы зажигания, необходимо проведение сложных и трудоемких экспериментов. Задача оперативной регистрации амплитуды разрядного тока и длительности искровой стадии разряда в полупроводниковых свечах может быть решена с использованием цифровых измерителей параметров быстротекущих импульсных процессов [5]. Энергия искровых разрядов как основной показатель, определяющий эффективность системы зажигания, может быть измерена с помощью цифрового измерителя энергии только в условиях лабораторий и испытательных стендов. При запуске ГТД энергию разрядов невозможно измерить, не нарушая динамику процессов воспламенения и горения смеси в камере сгорания или пусковом воспламенителе. Это связано с тем, что для измерения энергии разрядов вход одного из измерительных датчиков – делителя напряжения необходимо подключать непосредственно к электродам на рабочем торце свечи. При подключении делителя к высоковольтному вводу в свечу измеряется падение напряжения не только в искровом разряде, но и на электродах свечи, что недопустимо снижает точность измерений.

В [6] разработан теоретический метод расчетной оценки энергии искровых разрядов в емкостных системах зажигания с полупроводниковыми свечами на основе моделирования разрядных процессов и выявления диагностических параметров искровых разрядов, связанных с энергетическими параметрами, функциональными зависимостями. В качестве диагностических параметров приняты две величины: длительность подготовительной стадии разрядов $t_{\text{ПС}}$ и остаточное напряжение на накопительном конденсаторе после погасания разряда $U_{\text{ОСТ}}$. Длительность подготовительной стадии разрядов является параметром, который определяет величину $U_{\text{и}}$ – напряжение на накопительном конденсаторе к началу искровой стадии разрядов; величина $U_{\text{и}}$ входит в выражение для параметров W , I_m , $t_{\text{и}}$ в формуле (1) для критерия воспламеняющей способности. При этом величина $U_{\text{и}}$ находится в работе [6] путем аппроксимации зависимости $U_C = f(t)$ в течение времени $t_{\text{ПС}}$, например, линейной убывающей зависимостью вида:

$$U_C = U_0 - bt, \quad (3)$$

где b – коэффициент, зависящий от типа полупроводникового элемента в свече.

Зависимость (3) является достаточно приближенной, она может быть не только линейной, но и квадратичной с различными вариациями. Отсюда следует, что использование приближенного выражения (3) при определении параметров искровых разрядов W , I_m , $t_{\text{и}}$ приводит к существенным погрешностям.

На основании (3) выражение для параметра $U_{\text{и}}$ примет вид:

$$U_{\text{и}} = U_0 - bt_{\text{ПС}}, \quad (4)$$

Приведенный в [2, 6] подход к расчету параметров W , I_m , $t_{\text{и}}$ на основании измерений диагностических величин $t_{\text{и}}$ и $U_{\text{ОСТ}}$ не является единственным возможным. Если

принять в качестве одного из диагностических параметров величину $U_{\text{и}}$ вместо $t_{\text{пс}}$, алгоритмы расчетного определения энергетических параметров W , I_m , $t_{\text{и}}$ и критерия K существенно упрощаются путем исключения необходимости аппроксимации зависимости $U_C(t)$ в течение подготовительной стадии разрядов, что приводит к повышению точности расчетов.

В статье решается задача расчетного определения параметров искровых разрядов в полупроводниковых свечах и критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания, применяемых в современных ГТД самолетов различного назначения на основе диагностирования напряжений на накопительном конденсаторе $U_{\text{и}}$ и $U_{\text{ост}}$ с учетом вероятностного характера всех названных величин. Результаты исследований ориентированы на использование при оценке параметров искровых разрядов в полупроводниковых свечах типа СП-40, СП-43, СП-70.

С учетом нового введенного диагностического параметра $U_{\text{и}}$ выражения для параметров искровых разрядов W , I_m , $t_{\text{и}}$, полученные в [2], преобразуются к виду:

$$W = CU_m \frac{1 + \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right)} \left(U_{\gg} - |U_{\text{к-«}}| \right), \quad (5)$$

где $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ – добротность разрядной цепи; C – емкость накопительного конденсатора; L – индуктивность разрядной цепи; R – активное сопротивление разрядной цепи; U_m – амплитудное значение напряжения в искровом разряде.

Для максимального значения разрядного тока и длительности искровой стадии разрядов будем иметь:

$$I_m = \sqrt{\frac{C}{L}} U_{\gg} \exp\left(-\frac{\pi}{4Q}\right), \quad (6)$$

$$t_{\gg} = \frac{2L}{R} \ln \left| \frac{U_{\gg}}{U_{\text{к-«}}} \right|. \quad (7)$$

Подставляя (5), (6) и (7) в выражение (1) для критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания, после преобразования получим:

$$K = \frac{RU_m \left(U_{\gg} - |U_{\text{к-«}}| \right) \left(1 + \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right) \right)}{\sqrt{LC} \cdot U_0^2 \cdot f \cdot U_{\gg} \cdot \ln \left| \frac{U_{\gg}}{U_{\text{к-«}}} \right| \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right) \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, выражения (5), (6), (7) и (8) представляют собой зависимости параметров искровых разрядов и критерия воспламеняющей способности от параметров элементов зарядно-разрядных цепей систем зажигания. Анализ этих зависимостей показывает, что параметр I_m является функцией случайной величины $U_{\text{и}}$, а параметры W , $t_{\text{и}}$ и критерий K являются функциями двух диагностических случайных величин – $U_{\text{и}}$ и $U_{\text{ост}}$.

В ходе испытаний и оценки эффективности емкостных систем зажигания в условиях двигателей, или специализированных стендов напряжения на накопительных конденсаторах $U_{и}$ и $U_{ОСТ}$ могут фиксироваться осциллографическим методом, а также с помощью разработанных для этих целей цифровых измерителей величин $U_{и}$ и $U_{ОСТ}$ [7, 8]. Параметры $U_{и}$ и $U_{ОСТ}$, как показано выше, могут меняться в достаточно широких пределах даже в течение одного цикла запуска газотурбинного двигателя. При этом меняются и параметры разрядов в свечах W , I_m , $t_{и}$, а также критерий K . При выходе названных величин за допусковые границы система зажигания не обеспечивает требуемой эффективности. Вероятности попадания параметров в допусковые области представляют собой количественную меру оценки надежности при постепенных отказах и вычисляются на основании законов распределения диагностических величин $U_{и}$ и $U_{ОСТ}$.

Определив экспериментально законы распределения и важнейшие числовые характеристики диагностических параметров $U_{и}$ и $U_{ОСТ}$, представляется возможным на основе методов теории вероятностей и математической статистики определить законы распределения и числовые характеристики всех параметров разрядов и критерия K , определяющих эффективность системы зажигания.

В работе [2] на основе исследования закономерности разрядных процессов в емкостной системе зажигания при воспламенении топливовоздушной смеси в серийном пусковом воспламенителе в условиях запуска ГТД доказано, что параметр $U_{ОСТ}$ подчинен закону усеченного нормального распределения с плотностью вероятности [11]:

$$f(U_{\dot{k}-}) = c_0 \exp \left(- \frac{(U_{\dot{k}-} - m_{U_{\dot{k}-}})^2}{2\sigma_{U_{\dot{k}-}}^2} \right), \quad (9)$$

где $m_{U_{ОСТ}}$, $\sigma_{U_{ОСТ}}$ – математическое ожидание и дисперсия величины $U_{ОСТ}$. Величина c_0 выбирается из условия

$$\int_0^{U_0} f(U_{\dot{k}-}) dU_{\dot{k}-} = 1 \quad (10)$$

и равна

$$c_0 = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}}}{\sigma_{U_{\dot{k}-}} \left[\Phi \left(\frac{U_0 - m_{U_{\dot{k}-}}}{\sigma_{U_{\dot{k}-}} \cdot \sqrt{2}} \right) + \Phi \left(\frac{m_{U_{\dot{k}-}}}{\sigma_{U_{\dot{k}-}} \cdot \sqrt{2}} \right) \right]}, \quad (11)$$

где $\Phi \left(\frac{U_0 - m_{U_{\dot{k}-}}}{\sigma_{U_{\dot{k}-}} \cdot \sqrt{2}} \right)$, $\Phi \left(\frac{m_{U_{\dot{k}-}}}{\sigma_{U_{\dot{k}-}} \cdot \sqrt{2}} \right)$ – интегралы вероятности вида [9]:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (12)$$

На основании взаимосвязи параметров $t_{\text{ПС}}$ и $U_{\text{И}}$ в соответствии с формулой (4) и рис. 1 (а, б) с использованием результатов работы [2] определено, что вторая диагностическая величина $U_{\text{И}}$, как и параметр $t_{\text{ПС}}$ в [2], подчинены логарифмически-нормальному закону распределения с плотностью вероятности вида:

$$f(U_{\text{И}}) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi} \cdot U_{\text{И}}} \exp\left(-\frac{(\lg U_{\text{И}} - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (13)$$

где $A = lge$; c и σ – параметры данного распределения, связанные с математическим ожиданием и дисперсией величины $U_{\text{И}}$ следующими формулами [10]:

$$m_{U_{\text{И}}} = e^{\left(c/A + \sigma^2/2A^2\right)}. \quad (14)$$

$$D_{U_{\text{И}}} = e^{\left(2c/A + \sigma^2/A^2\right)} \left(e^{\sigma^2/A^2} - 1\right). \quad (15)$$

Проверка согласованности теоретического и статистического распределений величин $U_{\text{ОСТ}}$ и $U_{\text{И}}$ проводилась по критерию согласия χ^2 [9].

При теоретической оценке закономерностей распределения параметров искровых разрядов W , I_m , $t_{\text{И}}$ и критерия воспламеняющей способности принято допущение о независимости диагностических величин $U_{\text{ОСТ}}$ и $U_{\text{И}}$, что определяется механизмом гашения разряда в свече. Гашение разряда по аналогии с дуговым разрядом происходит потому, что после перехода разрядного тока через ноль электрическая прочность остаточного столба разряда превышает восстанавливающееся напряжение в свече, которое соответствует мгновенному значению напряжения на накопительном конденсаторе.

Для математических ожиданий и дисперсий параметров искровых разрядов W , I_m , $t_{\text{И}}$ получены следующие итоговые выражения:

$$m_{I_m} = \sqrt{\frac{C}{L}} m_{U_{\text{И}}} e^{-\pi/(4Q)}. \quad (16)$$

$$D_{I_m} = \frac{C}{L} D_{U_{\text{И}}} e^{-\pi/(4Q)}. \quad (17)$$

$$m_{t_{\text{И}}} = \frac{\sqrt{2}Ac_0L}{\sqrt{\pi}\sigma R} \int_0^{U_0} \frac{1}{U_{\text{И}}} \ln \left| \frac{U_{\text{И}}}{U_{\text{К-}}} \right| \cdot \exp\left\{-\frac{(\lg U_{\text{И}} - c)^2}{2\sigma^2} - \frac{(U_{\text{ОСТ}} - m_{U_{\text{К-}}})^2}{2\sigma_{U_{\text{К-}}}^2}\right\} dU_{\text{И}} dU_{\text{К-}}. \quad (18)$$

$$D_{t_{\text{И}}} = \frac{Ac_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{U_0} \left(\frac{2L}{R} \ln \left| \frac{U_{\text{И}}}{U_{\text{К-}}} \right| - m_{t_{\text{И}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{U_{\text{И}}} \exp\left\{-\frac{(\lg U_{\text{И}} - c)^2}{2\sigma^2} - \frac{(U_{\text{ОСТ}} - m_{U_{\text{К-}}})^2}{2\sigma_{U_{\text{К-}}}^2}\right\} dU_{\text{И}} dU_{\text{К-}}.$$

$$\left. - \frac{(U_{\dot{k}-} - m_{U_{\dot{k}-}})^2}{2\sigma_{U_{\dot{k}-}}^2} \right\} dU_{\dot{k}-} \quad (19)$$

$$m_W = CU_m \frac{1 + \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right)} (U_{\dot{k}-} - m_{U_{\dot{k}-}}). \quad (20)$$

$$D_W = C^2 U_m^2 \frac{\left(1 + \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right)\right)^2}{\left(1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2Q}\right)\right)^2} (D_{U_{\dot{k}-}} + D_{U_{\dot{k}-}}). \quad (21)$$

Правые части формул (18), (19) не могут быть выражены в элементарных функциях, поэтому величины $m_{U_{\dot{k}-}}$ и $D_{U_{\dot{k}-}}$ вычисляются приближенно по формуле парабол (Симпсона) [12].

Математическое ожидание критерия воспламеняющей способности K определяется при подстановке в выражение (1) математических ожиданий параметров W , I_m , t_{II} , определяемых по формулам (16), (18) и (20).

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные значения математических ожиданий и дисперсий параметров разрядов W , I_m , t_{II} , полученные в работе [2]. Как видно из табл. 1, теоретические и расчетные значения числовых характеристики случайных параметров разрядов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расхождения в определении математических ожиданий m_{I_m} , $m_{t_{II}}$, m_W не превышают 8%.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения математических ожиданий и дисперсий параметров разрядов

Параметр разряда	m_{I_m} , А	D_{I_m} , А ²	$m_{t_{II}}$, мкс	$D_{t_{II}}$, мкс ²	$m_W \cdot 10^2$, Дж	$D_W \cdot 10^4$, Дж ²
Эксперимент	290	782	6.3	2.88	7.24	1.06
Расчет	307	727	5.8	2.62	7.80	1.40
Расхождение, %	5.9	7.0	7	9.0	7.7	33

Таким образом, в результате теоретического анализа вероятностных параметров искровых разрядов в полупроводниковых свечах на основании полученных экспериментально законов распределения диагностических величин напряжений на накопительном конденсаторе U_{OCT} и U_{II} и функциональных зависимостей параметров W , I_m , t_{II} , от величин U_{OCT} и U_{II} определены числовые характеристики параметров разрядов W , I_m , t_{II} , входящих в выражение для критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания.

Решенная в статье задача дает возможность расчетного определения параметров, характеризующих эффективность емкостных систем зажигания по измерениям диагностических величин в условиях невозможности измерения параметров искровых разрядов в свечах с использованием прямых методов измерения, например, в реальных условиях стендов по испытаниям двигателей.

Решенная задача является также основой для разработки методики допускового контроля параметров емкостных систем зажигания путем определения законов распределения вероятностных параметров разрядов с оценкой вероятностей попадания параметров в границы заданных допусковых областей, определяемых требованиями к надежному воспламенению топливовоздушных смесей в камерах сгорания двигателей.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-29-00713 “Поиск путей повышения высотности запуска современных и перспективных газотурбинных двигателей на основе совершенствования систем зажигания”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабин М.А., Кац Б.М., Литвинов Б.М. Запуск авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1968 г. 228 с.
2. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
3. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в газотурбинных двигателях // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 56–60.
4. Вахитов Р.Ш., Гизатуллин Ф.А., Комиссаров Г.В. Разрядные процессы в системе зажигания с полупроводниковой свечой припуске ГТД // Авиационная промышленность. 1979. № 9. С. 24–25.
5. Гизатуллин Ф.А., Зайцев В.Н., Великжанин И.А., Алимбеков Л.И. Методы и средства измерения параметров разрядов в свечах зажигания газотурбинных двигателей // Измерительная техника. № 6. 1992.
6. Гизатуллин Ф.А. Метод контроля эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей // Известия вузов. Авиационная техника. 1999 г. № 3. С. 82–84.
7. Гизатуллин Ф.А., Абдрахманов В.Х. Измеритель остаточного напряжения на накопительном конденсаторе в емкостных системах зажигания. Патент на изобретение №2179322, опубл. 10.02.2002, Бюл. № 4.
8. Гизатуллин Ф.А., Юшкова О.А. Инструментарий для исследования некоторых аспектов надежности и ресурса работы полупроводниковых свечей зажигания // Известия вузов. Авиационная техника. № 2. 2023.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2006. 576 с.
10. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М.: Советское радио, 1966. - 165 с.
11. Половко А.М., Гуров С. В. Основы теории надежности / Учебник для ВУЗов, СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
12. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. М.: Наука, 1978. Т. 1. 456 с.

Calculated Determination of Spark Discharge Parameters in Capacitive Ignition Systems of Gas Turbine Engines Based on Diagnosing Voltages on Storage Capacitors

F. A. Gizatullin^{a, *}, O. A. Yushkova^{a, **}

^aUfa University of Science and Technology, Ufa, Russia

^{}e-mail: elaint@yandex.ru,*

*^{**}e-mail: yushkova-usatu@bk.ru*

The calculation results of the spark discharges probabilistic parameters in semiconductor spark plugs of capacitive ignition systems are presented: the energy and duration of discharges, discharge current and the criterion for the ignition ability of ignition systems based on measurements of two diagnostic quantities when it is impossible to directly measure these parameters under the conditions of gas turbine engines and full-scale test benches. Two voltages on the storage capacitor of ignition systems, measured by easily accessible means, are taken as diagnostic parameters – the voltage during the transition of the preparatory stage of the discharges to the spark stage and the voltage on the capacitor after the discharge in the semiconductor spark plug goes out. The laws of distribution of diagnostic quantities were experimentally determined, using methods of probability theory, expressions were obtained for the numerical characteristics of discharge parameters as a function of diagnostic quantities and characteristics of the elements of discharge circuits of ignition systems.

Keywords: capacitive ignition system, diagnostic parameter, spark discharge parameter