

УДК 621.452.3

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН, Р. М. САЛИХОВ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЖИМА РАБОТЫ ОСЦИЛЛЯТОРА В СОСТАВЕ ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

Предложен подход к определению режима работы осциллятора в составе плазменных систем зажигания авиационных ГТД. Требуемая мощность осциллятора находится на основе условия нарушения устойчивости электродуговых процессов в плазменных свечах в напряженных условиях запуска ГТД, когда происходит рассогласование внешней характеристики источника питания и вольт-амперной характеристики дугового разряда. *Плазменная система зажигания; осциллятор; дуговой разряд; вольт-амперная характеристика; устойчивость дугового разряда*

Среди электрических систем зажигания наиболее перспективными считаются плазменные системы зажигания, которые подразделяются на собственно плазменные, плазмохимические, импульсные плазменные. Плазменные системы зажигания менее критичны к месту установки свечи по сравнению с традиционными емкостными и индуктивными системами, так как плазменная струя проникает на значительные расстояния и обладает большей площадью поверхности контакта с горючей смесью. Плазменная система зажигания может быть особо эффективной при необходимости обеспечения запуска ГТД без кислородной подпитки, при необходимости расширения пусковых характеристик камер сгорания в сложных условиях эксплуатации, особенно при запуске ГТД на больших высотах и скоростях полета [1].

Плазменная система зажигания представляет собой генератор плазменной струи постоянного или переменного тока. В состав этой системы входит осциллятор – устройство, создающее последовательность высоковольтных импульсов, инициирующих образование электрической дуги низкого напряжения в плазменной свече. В плазменной системе зажигания с воздушным искровым зазором, в отличие от емкостных систем зажигания с полупроводниковыми свечами, образование дугового разряда критично к параметрам среды, для надежного запуска двигателя в напряженных условиях полета, например на больших высотах или при высоких скоростях, необходимым условием является образование в плазменной свече устойчивого дугового разряда.

Наиболее неблагоприятные условия с точки зрения обеспечения устойчивости дугового разряда создаются в высотных условиях запуска ГТД, когда граница циркуляционной зоны в камере сгорания меняет свое положение относительно свечи и свеча оказывается в зоне высоких скоростей потока. В этом случае падение напряжения в дуговом разряде возрастает в силу увеличения длины дуги, условие устойчивости дуги может нарушиться.

Известным способом повышения степени устойчивости дуги является увеличение напряжения источника питания, однако это сопряжено с ростом потребляемой мощности.

В критических условиях при нарушении устойчивости горения дугового разряда происходит гашение дуги, ток через дугу падает до нуля. Дуговой промежуток в плазменной свече зажигания деионизируется, электрическая прочность междуэлектродного промежутка восстанавливается. Возможна ситуация, когда повторное образование дуги под действием ионизирующих импульсов осциллятора может не произойти. Очевидно, что действие осциллятора будет эффективным в том случае, когда при нарушении устойчивости дугового разряда ионизирующий импульс осциллятора возникает в промежутке времени гашения дуги, когда еще не происходит полной деионизации дугового промежутка.

В статье решается задача определения режима работы осциллятора, обеспечивающего эффективное повторное зажигание дуги после нарушения устойчивости горения дуги под действием параметров среды.

Для решения задачи проведем анализ устойчивости дуги в плазменной системе зажигания с учетом нелинейности дугового разряда.

Силовая цепь плазменной системы зажигания постоянного тока содержит подключенные к напряжению U_0 последовательно соединенные активное сопротивление R , индуктивность L и плазменную свечу с падением напряжения $U_d(i)$. Уравнение баланса напряжений в переходном режиме имеет вид:

$$U_0 = Ri + L \frac{di}{dt} + U_d(i). \quad (1)$$

Известно, что устойчивое горение дуги постоянного тока обеспечивается согласованием внешней характеристики источника питания и вольт-амперной характеристики электрической дуги, эти характеристики должны иметь, по крайней мере, одну точку пересечения. В общем случае, при наличии источника постоянного напряжения и падающей нелинейной вольт-амперной характеристики дуги возможны две точки пересечения внешней характеристики источника и ВАХ дуги. Эти точки являются точками равновесия, поскольку в них $L di / dt = 0$. На рис. 1 показано взаиморасположение вольт-амперной характеристики дуги и реостатной характеристики $U = U_0 - iR$, соответствующее наличию точек равновесия 1 и 2. В одной точке пересечения равновесие устойчивое, в другой неустойчивое; вид равновесия зависит от того, какая величина является большей – балластное сопротивление силовой цепи, определяющее крутизну реостатной характеристики, или абсолютная величина динамического сопротивления дуги. В точке устойчивого равновесия (точка 1 на рис. 1) балластное активное сопротивление цепи превышает абсолютную величину динамического сопротивления дуги, т. е. внешняя характеристика источника является более круто падающей по сравнению с ВАХ дуги [2].

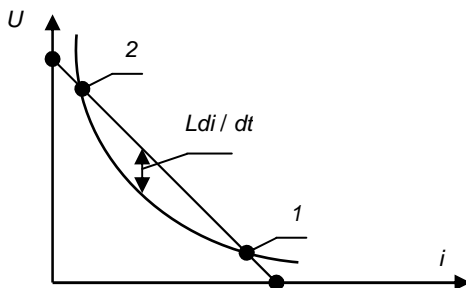


Рис. 1. Внешняя характеристика источника питания и ВАХ дуги

Следует отметить, что в реальных плазменных системах зажигания предусматривается токовая стабилизация, осуществляемая различными способами, внешняя характеристика ис-

точника питания в этом случае является нелинейной, однако это обстоятельство не нарушает в целом ход дальнейшего анализа. Примем, что условием нарушения устойчивости дуги является условие $U_d(i) > U_0$, решение для переходного тока при гашении дуги имеет вид:

$$i = \frac{U_0}{R} - \left(\frac{U_d}{R} \right) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2)$$

где $\tau = L/R$ – постоянная времени.

На основании (2) определяется время гашения дугового разряда:

$$t_r = \frac{L}{R} \ln \frac{U_d(i)}{U_d(i) - U_0}. \quad (3)$$

Это выражение является основой для выбора режима работы осциллятора, обеспечивающего образование в междуэлектродном промежутке плазменной свечи хотя бы одного ионизирующего импульса за время гашения дуги, когда еще не происходит полного восстановления электропрочности дугового промежутка.

Падение напряжения в дуговом разряде $U_d(i)$, входящее в (3), может быть описано различным образом, например в зависимости от конструкции плазмотрона или особенностей среды в зоне образования дугового разряда. Для ГТД наземного применения наибольшее распространение в настоящее время получили плазмотроны, питаемые постоянным током [3]. Применительно к плазмотронам ГТД, используемым в составе газоперекачивающих агрегатов, зависимость падения напряжения в дуговом разряде от тока и расхода плазмообразующего воздуха описывается обобщенным уравнением вольт-амперной характеристики воздушной дуги для токов до 30 А [3, 4]:

$$U_d(i) = 305 \left(\frac{I^2}{G_{\text{вп}} d_1} \right)^{-0,12} \left(\frac{G_{\text{вп}}}{d_1} \right)^{0,08} \left(\frac{l_1}{d_1} \right)^{0,56} (p d_1)^{0,20}, \quad (4)$$

где $G_{\text{вп}}$ – расход плазмообразующего воздуха через плазмотрон; l_1 и d_1 – длина и диаметр дугового канала; p – давление в конце электродуговой камеры. Формула (4) справедлива для соотношений $l_1/d_1 = 1,5-3,75$. Схема дугового канала плазмотрона для этого случая показана на рис. 2 [3].

Для авиационных ГТД с высотным запуском, когда рабочий торец плазменной свечи располагается в пристеночной области камеры сгорания в зоне высоких скоростей потока, возможно использование известной эмпирической формулы для токов до 20 А [5]:

$$U_d(i) = \frac{Cl}{I^n} (10^{-5} p)^m, \quad (5)$$

где I – ток; C, m – постоянные коэффициенты; p – давление, Па; n – показатель степени, характеризующий крутизну вольт-амперной характеристики дуги; $l = f(\delta, V)$ – длина дуги, зависящая, в основном, от междуэлектродного зазора δ и скорости потока V в зоне дугового разряда.

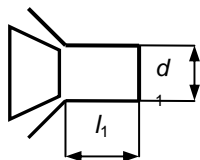


Рис. 2. Схема дугового канала плазмотрона

Следует отметить, что зависимость длины дуги от скорости потока является определяющей; при высотном запуске ГТД граница циркуляционной зоны в камере сгорания меняет свое положение и плазменная свеча оказывается в зоне высоких скоростей потока в отличие от запуска двигателя в наземных условиях, когда рабочий торец свечи располагается вблизи границы циркуляционной зоны, где скорость потока невысока и условия воспламенения смеси являются достаточно комфортными. Для определения предельного режима работы осциллятора в составе плазменной системы зажигания для обеспечения повторного зажигания дугового разряда после возможного при запуске ГТД в высотных условиях нарушения устойчивости дугового разряда используем условие:

$$T \leq t_r, \quad (6)$$

где T – период следования высоковольтных импульсов осциллятора.

В плазменной системе зажигания принцип действия осциллятора основан на создании высоковольтных импульсов при разряде накопительного конденсатора на первичную обмотку импульсного трансформатора после пробоя коммутирующего разрядника. В этом случае мощность, потребляемая осциллятором, равна:

$$P = \frac{CU_1^2 f}{2\eta}, \quad (7)$$

где C – емкость накопительного конденсатора; U_1 – напряжение пробоя разрядника; η – коэффициент, учитывающий потери в зарядной и разрядной цепях; $f = 1/T$ – частота следования высоковольтных импульсов.

С учетом (3) и (6) для требуемой мощности осциллятора запишем:

$$P \geq \frac{CU_1^2 R}{2\eta L \ln \frac{U_d(i)}{U_d(i) - U_0}}, \quad (8)$$

где падение напряжения в дуговом разряде $U_d(i)$ определяется на основании выражений (4) или (5) в зависимости от назначения ГТД и условий в камерах сгорания.

Предлагаемый подход к определению режима работы осциллятора с учетом времени гашения дуги в напряженных условиях работы камер сгорания при высотном запуске ГТД может привести к завышенным значениям потребляемой осциллятором мощности, которая будет избыточной при наземном запуске двигателя, когда устойчивость дуговых процессов является высокой. Данное обстоятельство является достаточным основанием для создания управляемых систем зажигания, в которых режимы работы осцилляторов и напряжения источников питания силовых цепей будут меняться по заданной программе в зависимости от условий запуска двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин Ф. А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
2. Таев И. С. Электрические аппараты. М.: Энергия, 1977. 272 с.
3. Плазменные системы газоперекачивающих агрегатов / Г. Ф. Романовский [и др.]. СПб.: Недра, 1992. 142 с.
4. Гизатуллин Ф. А., Худяев В. Н. Моделирование и исследование процессов в плазменной системе зажигания // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 6 (24). С. 170–177
5. Основы теории электрических аппаратов / И. С. Таев [и др.]. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.

ОБ АВТОРАХ



Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, проф., зав. каф. электрооборуд. ЛА и наземн. транспорта. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1972). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА, эл-там и уст-вам выч. техники и систем упр-я (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. систем зажигания двигателей ЛА.



Салихов Ренат Мунирович, мл. науч. сотр., зав. лаб. той же каф. Дипл. инж. по электрооборудованию ЛА (УГАТУ, 1997). Иссл. в обл. плазменных систем зажигания двигателей ЛА.