

рованной отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Гибкие трубопроводы» Уфимского государственного авиационного технического университета, в Уральском филиале НИИД, а также в других НИИ и лабораториях вузов.

Анализ технико-экономических показателей разработанной номенклатуры гибких металлических рукавов и сильфонных компенсаторов и сопоставление с аналогичными показателями, приведенными в каталогах ведущих зарубежных фирм, показал, что разработанная номенклатура гибких металлических трубопроводов (ГМТ) не уступает лучшим зарубежным образцам (табл., где du — условный внутренний диаметр в «просвет», R_{\min} — минимальный допустимый радиус изгиба оси рукава, выражаемый в величине условного внутреннего диаметра du ; $p_{\text{раб}}$ и $t_{\text{раб}}$ — максимальные давление и температура рабочей среды). Об этом свидетельствует выполнение заказов зарубежных фирм на изготовление и поставку партий гибких металлических трубопроводов. Анализ мировой патентной информации, полученные авторские свидетельства и патенты свидетельствуют о принципиальной новизне, а запросы отечественных и зарубежных потребителей — о перспективности новых конструкций ГМТ и способов их изготовления.

УДК 621.45.044; 621.317.08

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН

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

Излагаются результаты разработки методов и средств контроля эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей. Описывается схема цифрового измерителя динамических пробивных напряжений полупроводниковых свечей. Анализируется существо косвенного метода определения энергии искровых разрядов в свечах в условиях камер сгорания; приводится расчетное выражение для определения энергии разрядов, лежащее в основе метода и полученное в результате моделирования разрядных процессов в емкостных системах зажигания с учетом нелинейных свойств полупроводниковых свечей

Емкостная система зажигания; полупроводниковая свеча; контроль эффективности; параметры искровых разрядов; цифровые измерители; измерительный комплекс; измеритель пробивного напряжения свечей; косвенный метод оценки энергии разрядов

Задачи контроля эффективности систем зажигания двигателей возникают на различных этапах жизненного цикла, включая разработку, производство и эксплуатацию. Перечень таких задач достаточно обширен, контроль эффективности предполагает, в том числе, оценку общей работоспособности систем зажигания, оценку энергетической эффективности разрядных цепей и воспламеняющей способности свечей зажигания. В процессе разработки и доводки камер сгорания и систем воспламенения возникают, кроме того, специфические задачи контроля, заключающиеся в определении времени задержки воспламенения смеси, оценке количества жидкой фазы топлива

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусенков А. П., Лукин Б. Ю., Шустов В. С. Унифицированные гибкие элементы трубопроводов: Справочное пособие. М.: Изд-во стандартов, 1988. 266 с.
2. Крюков А. И., Глинкин И. М., Фионин В. И. Гибкие металлические рукава. М.: Машиностроение, 1970. 204 с.

ОБ АВТОРАХ

Итбаев Валерий Каюмович, профессор кафедры авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1970), д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1996). Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники (1997). Исследования в области прочности и динамики трубопроводных коммуникаций летательных аппаратов.

Брюханов Анатолий Михайлович, ст. науч. сотр., зав. научно-иссл. лаб. по гибким трубопроводам кафедры авиационных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1967), канд. техн. наук по технологии производства ЛА и двигателей (УАИ, 1981). Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники (1997). Исследования и разработки в области технологии производства гибких трубопроводов.

или одного из топливных компонентов, поступающих на рабочие торцы свечей.

Принятая в отрасли методика оценки технического уровня емкостных систем зажигания газотурбинных двигателей не предусматривает всех задач контроля и ориентирована на их оценку и сравнение по основному энергетическому показателю - величине накопленной энергии, а также по значениям косвенных параметров, в частности, по величине пробивного напряжения коммутирующих разрядников, частоте следования разрядов в свечах. При этом параметры искровых разрядов - энергия, длительность разрядов и амплитуда разрядного тока, определяющие энергетическую эф-

фективность и воспламеняющую способность систем зажигания, не контролируются.

Такой подход к оценке эффективности систем зажигания оправдан при наличии однозначной зависимости параметров искрового разряда от величины накопленной энергии и косвенных параметров. Однако известно, что при фиксированной величине энергии емкостного накопителя энергия разрядов в свече может различаться в несколько раз в зависимости от параметров разрядной цепи и свечи, а также под воздействием множества дестабилизирующих факторов в процессе запуска двигателя [1]. Поэтому применяемый подход к контролю состояния систем зажигания недостаточно эффективен, он не ориентирован на оценку фактических значений параметров искровых разрядов в свечах.

Особо остро вопросы контроля поставила практика разработки и доводки двигателей, для которых на этапе опытно-конструкторских работ не могут быть решены в полном объеме задачи по отработке систем воспламенения, предусмотренные отраслевыми стандартами. Во время доводочных работ по обеспечению требуемых пусковых характеристик камер сгорания и при возникновении проблем в эксплуатации по стабильности запусков двигателей возникают вопросы о стабильности следующих параметров систем зажигания: энергии и длительности разрядов в свечах, амплитуды разрядного тока, амплитуды высоковольтных импульсов напряжения на выходе агрегатов зажигания, длительности подготовительной стадии разряда в полупроводниковых свечах. Актуальность контроля указанных параметров значительно возросла в связи с новейшими достижениями в области исследования воспламенения горючих смесей искровыми разрядами. Разработанная автором обобщенная модель искрового воспламенения позволила установить критерий электроискровой стабилизации пламени, аналогичный известному критерию Михельсона для стабилизации пламени плохо обтекаемыми телами, а также критерии воспламеняющей способности систем зажигания применительно к различным способам стабилизации пламени в камерах сгорания и пусковых воспламенителях, однозначно определяющие конечный результат процесса воспламенения. Установленные критерии являются функциями ряда параметров систем зажигания, в том числе параметров искровых разрядов в свечах [2].

В статье рассматриваются возможности и области применения наиболее эффективных методов и средств контроля систем зажигания и систем воспламенения в целом, разработанных в УГАТУ совместно с представителями ЦИАМ и УНПП «Молния», а также приводятся результаты новых разработок в данной области.

Для повышения эффективности контроля систем зажигания, сокращения времени и материальных затрат на доводку систем воспламенения газотурбинных двигателей решен ряд взаимосвязанных задач. Во-первых, разработаны цифровые измерители следующих параметров быстротеку-

щих импульсных разрядных процессов: энергии и длительности разрядов в полупроводниковых свечах, длительности полупериода разрядного тока, амплитуды разрядного тока, амплитуды высоковольтных импульсов напряжения на выходе емкостных агрегатов зажигания [3, 4]. Во-вторых, решена задача создания измерительного комплекса, позволяющего одновременно регистрировать в цифровой форме перечисленные выше параметры, а также измерять время задержки воспламенения топливовоздушной смеси в камерах сгорания при оценке эффективности систем зажигания в условиях огневых стендов. Различные варианты измерительного комплекса описаны в работах [5, 6]. Все отдельные измерители в составе измерительного комплекса обладают достаточной для своей области применения точностью и быстродействием.

Отличительной особенностью полупроводниковых свечей газотурбинных двигателей по сравнению с искровыми свечами является зависимость пробивного напряжения от величины емкости накопительного конденсатора системы зажигания. Эта особенность определяется механизмом развития разряда, наличием подготовительной стадии разряда, характеризующейся нагревом полупроводникового материала до температур, обеспечивающих интенсивную ионизацию междуэлектродного промежутка над поверхностью полупроводника. На практике принято измерять пробивное напряжение полупроводниковых свечей при фиксированной величине емкости накопительного конденсатора в условиях специального стенда. При этом применяемый способ измерения пробивного напряжения не позволяет обеспечить высокую точность измерений, так как измеряется напряжение, соответствующее подготовительной стадии разряда в свече, а не искровой стадии, в течение которой выделяется полезная энергия разряда, воспламеняющая горючую смесь. Кроме того, применяемая технология измерения напряжений ориентирована на регистрацию пробивного напряжения в условиях однократного пробоя свечи. На рис. 1 приведена функциональная схема разработанного измерителя динамических пробивных напряжений полупроводниковых свечей, дополняющего приведенный выше перечень цифровых измерителей, а на рис. 2 — временные диаграммы, поясняющие способ измерения.

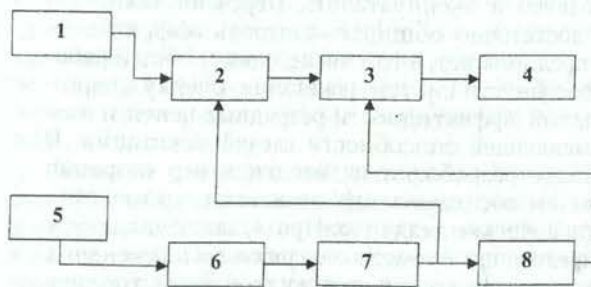


Рис. 1

Измеритель позволяет регистрировать с высокой точностью значение напряжения, соответствующего началу искровой стадии разряда в полупроводниковых свечах, а также обеспечивает измерение этой характерной величины для каждого разрядного импульса в последовательной серии разрядов. К преимуществам измерителя относятся, кроме того, возможность регистрации пробивного напряжения полупроводниковых свечей при их работе непосредственно от емкостных агрегатов зажигания.

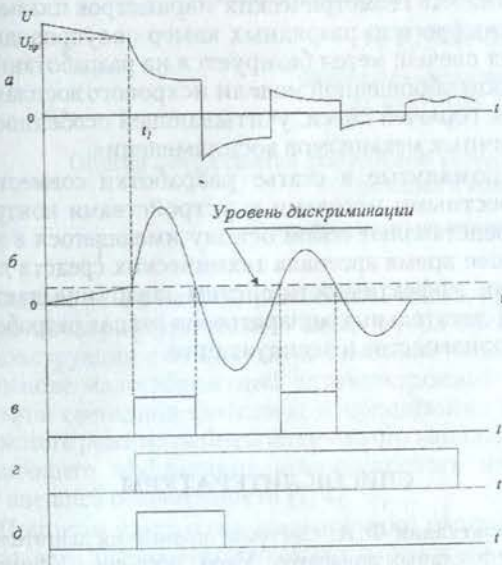


Рис. 2

Функциональная схема измерителя содержит основную измерительную цепь и цепь синхронизации. Измерительная цепь включает делитель напряжения 1, подключаемый к свече зажигания, устройство выборки-хранения 2, аналого-цифровой преобразователь 3 и блок цифровой индикации 4. Цепь синхронизации предназначена для перевода устройства выборки-хранения в режим хранения в момент перехода подготовительной стадии разряда в искровую и запуска АЦП. Цепь синхронизации состоит из датчика тока 5, подключаемого в разрядную цепь, дискриминатора уровня 6 и двух одновибраторов 7 и 8. Кривая падения напряжения в свече показана на рис. 2, а, сигнал с выхода датчика тока — на рис. 2, б. Устройство выборки-хранения отслеживает напряжение в полупроводниковой свече в течение подготовительной стадии разряда (участок $0-t_1$ на рис. 2, а). Момент пробоя свечи t_1 определяется дискриминатором уровня, сравнивающим сигнал с выхода датчика тока агрегата зажигания с уровнем дискриминации, который задается соответствующим току перехода подготовительной стадии разряда в искровую. Сигнал с выхода дискриминатора уровня (рис. 2, в) запускает первый одновибратор (рис. 2, з), который переводит устройство выборки-хранения в режим хранения и запускает второй одновибратор (рис. 2, д). Импульс с выхода второго одновибратора запускает

АЦП. По окончании импульса первого одновибратора, длительность которого заведомо превышает длительность разряда, устройство выборки-хранения вновь переводится в режим выборки, а информация на выходе АЦП остается неизменной до прихода следующего разрядного импульса в свечу. С началом следующего разряда процесс измерения пробивного напряжения свечи повторяется.

Подключение делителя напряжения к испытываемой полупроводниковой свече осуществляется с помощью специального переходного устройства [7], обеспечивающего высокую точность измерения благодаря контакту входного кабеля делителя с электродами свечи непосредственно в зоне образования искрового разряда.

Разработанный измеритель может использоваться для анализа эффективности полупроводниковых свечей на этапах исследования, разработки, производства и эксплуатации.

Специфика контроля параметров разрядов в свечах зажигания связана с особенностями влияния на разрядные процессы условий в камере сгорания и пусковых воспламенителях. Искровой разряд в свече подвергается широкому кругу возмущающих воздействий (температура, давление, поток топливовоздушной смеси). 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 смеси не происходит.

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 в условиях камер сгорания может быть решена с использованием разработанных цифровых измерителей. 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 динамики процессов воспламенения и горения смеси в камере сгорания или в пусковом воспламенителе. Это связано с тем, что для измерения энергии разрядов вход одного из измерительных датчиков — делителя напряжения — необходимо подключать непосредственно к электродам по рабочему торцу 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.

Актуальная задача разработки метода определения энергии искровых разрядов в свечах в усло-

виях камер сгорания и пусковых воспламенителей решена в работе [8] на основе результатов экспериментальных и теоретических исследований разрядных процессов в емкостных системах зажигания. Существо метода заключается в определении энергии разрядов на основе измерения легкодоступными способами установленных диагностических параметров, связанных с энергией разрядов функциональной зависимостью. В качестве диагностических параметров определены длительность подготовительной стадии разряда в полупроводниковых свечах t_{nc} и остаточное напряжение на емкостном накопителе после погасания разряда $U_{ост}$, являющиеся случайными величинами и изменяющиеся в широких пределах даже в течение одного цикла запуска газотурбинного двигателя. Закон распределения энергии разрядов найден в работе [8] теоретически на основе известных методов теории вероятностей по экспериментально определенным законам распределения установленных диагностических параметров t_{nc} и $U_{ост}$.

Однако разработанный метод не в полной мере учитывает нелинейные свойства свечей, расчетное выражение для энергии разрядов, лежащее в основе метода, получено без учета особенностей вольт-амперных характеристик искровых разрядов. Проведенные исследования разрядных процессов в серийных полупроводниковых свечах различных типов показали, что уточненное выражение для энергии искровых разрядов может быть получено при аппроксимации кривой падения напряжения в свече в течение каждого полупериода функций вида

$$U_{CBi} = (-1)^{i+1} U_H (1 - k \sin \omega t), \quad (1)$$

где i — номер полупериода кривой падения напряжения в свече; U_H — максимальное значение падения напряжения в свече; k — коэффициент.

В результате моделирования разрядных процессов в емкостных системах зажигания с учетом особенностей развития подготовительной стадии разряда в современных серийных полупроводниковых свечах в итоге получено следующее выражение для определения энергии искровых разрядов:

$$W = U_H (U_0 - bt_{nc}) \times \left[\frac{C \left(1 + e^{-\frac{\pi \delta}{\omega}} \right)}{1 - e^{-\frac{\pi \delta}{\omega}}} - \frac{k}{\delta \omega L \left(\frac{\delta^2}{\omega^2} + 4 \right)} \right] \times \left(1 - \frac{U_{ост}}{U_0 - bt_{nc}} \right), \quad (2)$$

где U_0 — начальное напряжение на емкостном накопителе; C — емкость накопителя; L — индуктивность разрядной цепи; b — коэффициент, зависящий от свойств материала полупроводника в свече; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; $\delta = R/2L$; R — активное сопротивление разрядной цепи.

Закон распределения энергии разрядов для оценки вероятности попадания данного парамет-

ра в пределы допусковых областей, определяемых требованиями к надежному воспламенению топливовоздушной смеси в камерах сгорания и пусковых воспламенителях, находится на основании известных законов распределения диагностических величин t_{nc} и $U_{ост}$, входящих в (2), с использованием общего подхода, изложенного в [9].

Кроме перечисленных выше методов и средств контроля, существенный интерес для разработчиков систем зажигания представляет экспресс-метод оценки воспламеняющей способности свечей, разработанный совместно со специалистами УНПП «Молния». Существо метода заключается в оценке геометрических параметров плазменного выброса из разрядных камер полупроводниковых свечей; метод базируется на разработанной автором обобщенной модели искрового воспламенения горючей смеси, учитывающей особенности различных механизмов воспламенения.

Упомянутые в статье разработки совместно с известными методами и устройствами контроля представляют собой основу имеющегося в настоящее время арсенала технических средств для оценки эффективности систем зажигания двигателей летательных аппаратов на этапах разработки, производства и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин Ф. А. Системы зажигания двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 1998. 115 с.
2. Гизатуллин Ф. А. Методика проектирования емкостных систем зажигания / Уфимск. авиац. ин-т. Уфа, 1992. 59 с.
3. Гизатуллин Ф. А., Зайцев В. Н., Великжанин И. А., Алимбеков Л. И. Методы и средства измерения параметров искровых разрядов в свечах зажигания газотурбинных двигателей // Измерительная техника. 1992. № 6. С. 10–11.
4. Гизатуллин Ф. А., Зайцев В. Н., Алимбеков Л. И., Попов О. А. Измерители энергии искровых разрядов в свечах зажигания газотурбинных двигателей // Измерительные преобразователи и информационные технологии: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 1996. С. 160–164.
5. Гизатуллин Ф. А., Попов О. А. Измерительный комплекс для контроля параметров систем зажигания газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 1. С. 78–80.
6. Гизатуллин Ф. А., Зайцев В. Н., Попов О. А. Система контроля параметров устройств зажигания газотурбинных двигателей // Измерительные преобразователи и информационные технологии: Межвуз. науч. сб. Уфа: Гилем, 1996. С. 110–114.
7. А. с. 1592567 СССР. Устройство для испытания свечи зажигания / Ф. А. Гизатуллин, В. Н. Зайцев, М. С. Грибакин и др. МКИ F02P17/00. Б. И. 1990, № 34.
8. Гизатуллин Ф. А. Метод контроля эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 3. С. 82–84.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

ОБ АВТОРЕ

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, профессор, зав. кафедрой электрооборудования ЛА и наземного транспорта УГАТУ. Дипл. инженер по электрическим машинам и аппаратам (УАИ, 1972), д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА, элементам и устройствам вы-

числительной 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 быстротекущих импульсных процессов.

УДК 621.384

**УСИЛИТЕЛЬ ФОТОТОКА
С КОРРЕКЦИЕЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКА**

А. И. ИВАНОВ, А. Д. АБРАМОВ

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ
Тел: (3472) 23 78 36 E-mail: selena@mail.rb.ru

Описан метод снятия статической характеристики фотоприемника, а также способы ее линеаризации в измерительном усилителе

Фотоприемник; статическая характеристика; нелинейность

Одним из вариантов реализации портативного фотоколориметрического анализатора является конструкция с открытым оптическим каналом на основе малогабаритной оптоэлектронной пары типа светодиод-фотодиод и организации импульсного режима работы оптического канала, позволяющего эффективно компенсировать влияние внешней освещенности [1, 2].

При этом измерение концентраций растворов в широком диапазоне оптических плотностей связано с необходимостью работать в области малых световых потоков на начальном участке световой характеристики фотоприемника.

В процессе эксплуатации наиболее подходящих по параметрам чувствительности и площади кристалла фотодиодов типа ФДК-155, ФД-263, ФД-256 было установлено, что их световая характеристика на начальном участке имеет нелинейный характер, который проявляет себя в условиях изменяющейся фоновой засветки. Исследование и анализ характеристики чувствительности фотодиодов, а также разработка простых способов учета нелинейности их световой характеристики послужили целью данной работы.

Известные методики [3] получения характеристик фотоприемников направлены на определение дифференциальной крутизны с использованием моделей абсолютно черного тела и механического модулятора потока излучения. В настоящей работе предлагается методика, использующая неэталонный источник излучения с постоянным световым потоком необходимого спектрального состава, выступающим в качестве относительной единицы измерения падающего на фотодиод излучения. При этом измеряется реакция фотоприемника на постоянный световой поток при кратных ему уровнях фоновой засветки. Предлагается, по сути, способ задания оптической рабочей точки фотодиода, позволяющий с фиксированным шагом изменять падающий на фотоприемник световой поток без использования градуированного источника. Процесс построения статической харак-

теристики является итеративным и поясняется на рис. 1.

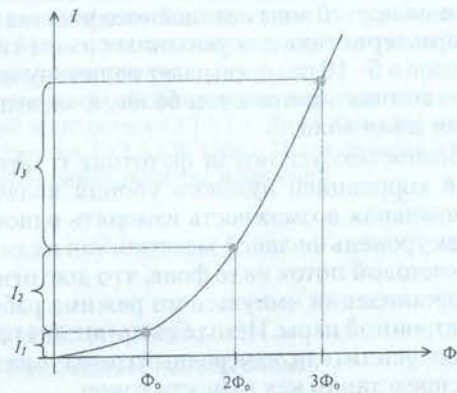


Рис. 1

На первом шаге на фотоприемник воздействует постоянный световой поток Φ_0 , который создаст на его выходе фототок величиной I_1 . На следующем шаге источник Φ_0 отключается и замещается источником смещения $\Phi_{см}$, создающим фототок, равный величине I_1 , в результате рабочая точка фотодиода перемещается вправо по оси светового потока на величину Φ_0 . Возобновление потока Φ_0 вызывает появление уже суммарного фототока $I_1 + I_2$. Далее источник $\Phi_{см}$ замещает удвоенный поток Φ_0 и создает фототок, равный данной сумме токов, и т. д. Таким образом, по оси абсцисс последовательно откладываются значения светового потока, кратные величине Φ_0 . Это позволяет равномерно двигаться по оси светового потока с шагом Φ_0 , независимо от характера и степени нелинейности световой характеристики фотоприемника. Каждая точка статической характеристики определяется как сумма реакций I_n на суммарный световой поток $n\Phi_0$.

Для реализации данного метода было разработано устройство, с помощью которого испытаны фотодиоды типов ФДК-155, ФД-263, ФД-256