

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕЧАХ ЗАЖИГАНИЯ ПРИ ЗАПУСКАХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

НИЦ институт имени Н.Е. Жуковского, ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова"
Никита Сергеевич Кюрегян, начальник группы,
Дмитрий Анатольевич Голенцов, к.ф.-м.н., начальник сектора,
Вячеслав Сергеевич Фланден, м.н.с.

В статье описаны технические характеристики разработанной экспериментальной системы оперативной диагностики разрядов на свечах зажигания авиационных ГТД. Приведены результаты исследований по измерению основных параметров разрядных импульсов при запусках некоторых двигателей в различных условиях и режимах на испытательных стендах. Представлены рекомендации по оптимизации разработок систем зажигания и внедрению системы диагностики в промышленность.

The article describes the technical characteristics of the developed experimental system of diagnostics of discharges on the spark plugs of aviation engines. The results of studies on the measurement of the main parameters of the discharge pulses at the start of some engines in different conditions are given. The recommendations on optimization of development of ignition systems are presented.

Ключевые слова: система зажигания, разрядный импульс, параметры разряда
Keywords: the ignition system, the discharge pulse, the discharge parameters

Актуальность исследований по оперативной диагностике процессов в электрических разрядах на свечах зажигания авиадвигателей вызвана, прежде всего, необходимостью оптимизации разработок систем зажигания (СЗ) и обеспечения надежного и эффективного воспламенения горючей смеси в камерах сгорания (КС) при запусках этих двигателей.

Определяющие параметры разрядов

Речь идет в данном случае о колебательных и аperiodических разрядах в емкостных системах зажигания, как наиболее распространенных в настоящее время. Основными параметрами таких разрядов, или точнее - разрядных импульсов, являются величины текущих значений тока i и напряжения u в них, а также их длительность τ . Эти параметры принципиально могут быть измерены и зарегистрированы в форме осциллограмм [1]. Такие параметры условно можно назвать первичными, на их базе могут быть определены или вычислены вторичные параметры (показатели, критерии), такие как:

I_m, U_m - наибольшие амплитуды тока и напряжения разрядных импульсов;

τ_{05}, τ_{nc} - длительности полупериода колебаний и подготовительной стадии разряда;

$q = \int iudt$ - текущее значение энергии, выделяемой в разрядном импульсе на свече;

$Q = \int_0^{\tau} iudt$ - вся энергия, выделенная на свече по окончании разрядного импульса;

$Z = \int_0^{\tau} idt$ - величина электрического заряда, израсходованного в разрядном импульсе;

$I = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} i^2 dt}$ - действующее значение тока в разрядном импульсе; и ряд других.

Сами разряды выполняют роль воспламеняющего агента в КС, а первичные и вторичные параметры определяют интенсивность и временной режим их энергетического воздействия на горючую смесь и, следовательно - воспламеняющую способность этих разрядов и функциональную эффективность СЗ. В силу сказанного, назовем эти параметры "определяющими параметрами разрядов" (ОПР), одновременно вкладывая в них же смысл определяющих параметров СЗ в целом.

Следует сказать, что вплоть до настоящего времени в промышленности отсутствует практический опыт исследований по оперативной диагностике этих определяющих параметров. Они никак не применяются и не регламентируются на этапах закладки новых КС и СЗ, в ходе их отлачных испытаний и совместно с двигателями на предмет обеспечения необходимых пусковых характеристик или контрольного мониторинга процесса запуска. Это обстоятельство связано, в первую очередь, с отсутствием разработанной штатной аппаратуры диагностики таких параметров, а также с отсутствием необходимой нормативно-правовой базы, устанавливающей и регламентирующей порядок осуществления такой диагностики на различных этапах разработки и испытаний СЗ, КС, двигателей.

Система диагностики разрядов

В последние годы были проведены работы [1-3], направленные на создание предпосылок для решения данной проблемы. Основной целью и содержанием данных работ были разработка экспериментальной системы диагностики разрядов (СДР), как прототипа штатной системы диагностики и ее практическая апробация. В частности, исследования заключались в:

- накоплении опыта работы с СДР по измерениям ОПР в стендовых условиях при испытаниях по запуску КС, двигателей;
- выявлении объективных связей и корреляций измеряемых ОПР с режимами запусков, состоянием рабочей среды в зоне свечи в КС, нормальным или аномальным режимом работы агрегата и свечи зажигания;
- создании методологии выбора оптимальных ОПР в разработках новых КС и СЗ для них;
- оценке сфер предполагаемого применения СДР и рекомендациях по созданию нормативно-правовой базы, необходимой для внедрения СДР в практику.

Схема разработанной экспериментальной СДР представлена на рисунке 1.

Структурно СДР состоит из измерительного модуля ИМ, включающего в себя датчик тока ДТ и датчик напряжения ДН, собранные на измерительном адаптере А_д; из линии передачи сигналов ЛПС тока i и напряжения u ; из системы сбора и обработки данных ССОД на базе аналого-цифрового преобразователя АЦП и персонального компьютера ПК. Измерительный модуль подключается к разрядному контуру системы зажигания между агрегатом зажигания АЗ и свечой зажигания Св. На рисунке 2 изображены измерительный модуль с датчиками, согласующие приставки и два кабеля линии передачи сигналов.

Выходной информацией СДР являются перечисленные выше ОПР. На рисунке 3 (вверху) в качестве примера показаны полученные осциллограммы тока и напряжения одного из разрядных импульсов, а также график (внизу) выделяемой в нем энергии на свече.

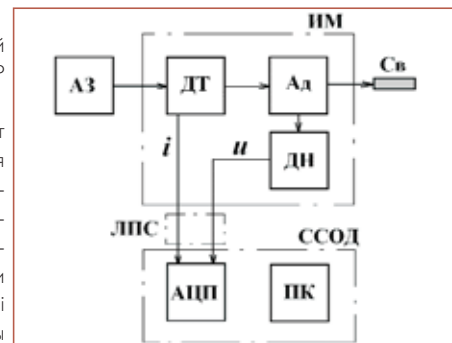


Рис. 1 Схема СДР и её связи с системой зажигания



Рис. 2 Элементы измерительных каналов СДР

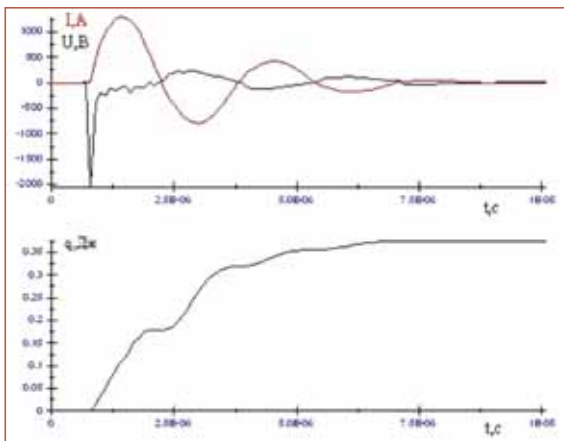


Рис. 3 Графики изменения i , u , q в разрядном импульсе на свече зажигания

- очень большая скважность их следования в серии - до нескольких тысяч;
- большое количество импульсов в серии, подлежащих регистрации в процессе цикла запуска КС, двигателя - до нескольких сотен.

Эти факторы обуславливают определенную подверженность измерительных каналов СДР, включая протяженные ЛПС, искажающим влияниям всевозможных наводок в силу наличия различных паразитных емкостей и взаимных индуктивностей в условиях монтажа системы на испытательных стендах. Кроме того, возникают определенные препятствия, связанные с необходимостью переработки большого объема информации с большой частотой дискретизации. Поэтому среди задач, решавшихся в ходе создания СДР, которые оказались наиболее проблематичными, следует, прежде всего, назвать две из них:

- обеспечение максимальной точности отображения регистрируемых импульсов с минимальными искажениями уровней и формы в процессе их преобразований и передачи в измерительных каналах;
- обеспечение последовательной регистрации без пропусков каждого из разрядных импульсов в их полной серии, имеющей место в циклах запуска КС, двигателя.

Первая задача решалась тщательной параметрической обработкой элементов измерительных каналов, применения в них реактивных компенсаторов и согласующих приставок, а также обработкой схемы точек заземления этих элементов в условиях монтажа на стенде. Вторая задача была решена за счет создания алгоритмов сбора и обработки данных, обеспечивших рациональное использование памяти АЦП. Они реализуют выделение ограниченных временных интервалов, содержащих разрядные импульсы, по срабатыванию триггера, регистрацию этих импульсов и идентификацию временных координат их начала.

Созданный в итоге экспериментальный образец СДР позволяет диагностировать на свечах колебательные и апериодические разрядные импульсы, происходящие от емкостных агрегатов зажигания с накопленной энергией от 0,5 до 20 Дж. Измерения обеспечиваются в границах амплитуд тока импульсов до 3 кА, амплитуд напряжения до 3 кВ, длительностей импульсов от 5 до 300 мкс, частот их следования от 0,5 до 50 Гц - то есть практически во всем диапазоне возможных режимов работы ныне существующих типов СЗ. При этом обеспечивается регистрация каждого импульса в их последовательной серии количеством не менее 300, частота дискретизации измерений составляет 10 МГц. Погрешность измерений по предварительным оценкам не превышает 5%, что на настоящий момент представляется вполне приемлемым и допустимым. Эти технические характеристики СДР определены и подтверждены в результате разнообразных исследований по диагностике разрядов на свечах, работавших как автономно в лабораторных условиях вне КС, так и в составе реальных КС при их запусках в условиях камерных и двигательных испытательных стендов.

Исследования по диагностике разрядов при запусках авиадвигателей

Один из циклов таких исследований был осуществлен при запусках в нормальных условиях самолетного двигателя на стенде ЦИАМ. На этом двигателе предусмотрен ступенчатый розжиг КС от полупроводниковой свечи зажигания, установленной в её пусковом воспламенителе. На рисунке 4 показано присоединение измерительного модуля с датчиками тока и напряже-

ния к свече на этом двигателе.

Характерными особенностями рассматриваемых разрядных импульсов, заметно затрудняющими их диагностику, являются:

- их малая длительность - от нескольких микросекунд;

- высокая граничная частота их амплитудного спектра - до 2 МГц;

Питание свечи производилось от агрегата зажигания с накопленной энергией 1 Дж, генерирующего колебательные разряды. Результаты диагностики разрядов на свече, полученные в одном из штатных запусков этого двигателя, представлены на рисунках 5 и 6.

Здесь в виде семейств графиков зарегистрированы и отображены все импульсы, имевшие место в серии при этом запуске (общее количество - 231).

Анализ осциллограмм показывает, что в значительной части импульсов в этой серии наблюдается явление так называемой "подготовительной стадии" разряда в виде некоторого интервала времени между передними фронтами импульса напряжения и импульса тока. В данном случае длительности этих подготовительных стадий соизмеримы с длительностями всего разряда и находятся в диапазоне до 3,5 мкс. Это известное и свойственное полупроводниковым свечам явление обычно связывают с ухудшением условий электрического пробоя межэлектродного промежутка свечи под воздействием на него жидкой или парообразной фазы топлива.

Получаемые таким образом результаты диагностики дают комплексное представление о величинах ОПР и диапазонах их изменения во всей серии разрядных импульсов в процессе запуска двигателя. В случае, представленном на рисунке 6, энергия Q изменялась в диапазоне 0,33...0,67 Дж. Программа сбора и обработки данных СДР позволяет представить изменение во времени любого из интересующих ОПР в порядке следования разрядных импульсов в серии, как это показано на рисунке 7 для энергии разрядов Q и длительности подготовительной стадии $t_{пс}$. Анализ графиков показывает, что все 231 зарегистрированных разряда при штатном запуске располагаются равномерно вдоль временной оси на отрезке 20 секунд без каких-либо пропусков со средней частотой 11,3 Гц. При этом наблюдается увеличение уровней энергии разрядов во второй половине их серии примерно после 10-ой секунды; с этого же момента начинает проявляться заметная подготовительная стадия разря-



Рис. 4 Монтаж измерительного модуля СДР на двигателе

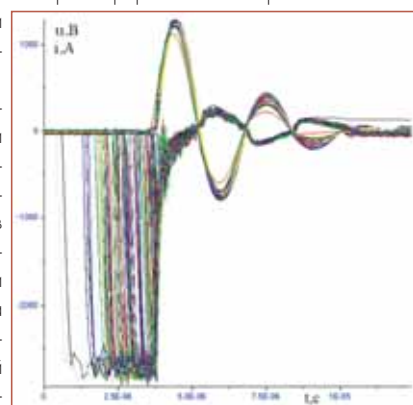


Рис. 5 Наложенные осциллограммы тока и напряжения в серии разрядных импульсов

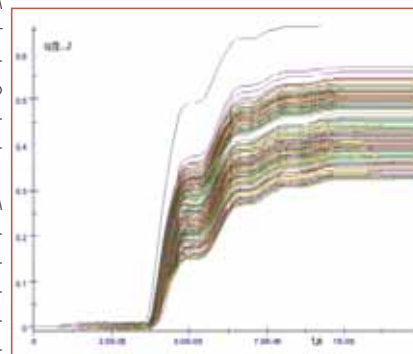


Рис. 6 Наложенные графики текущих значений выделяемых на свече энергий в серии разрядных импульсов

зависимости от времени. Анализ графиков показывает, что все 231 зарегистрированных разряда при штатном запуске располагаются равномерно вдоль временной оси на отрезке 20 секунд без каких-либо пропусков со средней частотой 11,3 Гц. При этом наблюдается увеличение уровней энергии разрядов во второй половине их серии примерно после 10-ой секунды; с этого же момента начинает проявляться заметная подготовительная стадия разря-

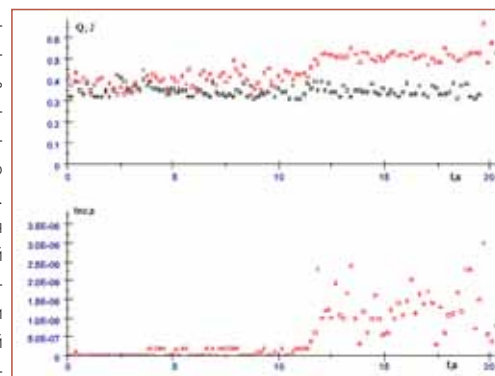


Рис. 7 Изменения выделенной энергии Q и длительности подготовительной стадии $t_{пс}$ в серии разрядных импульсов в процессе штатного запуска двигателя (красные точки) и при автономном включении СЗ без подачи топлива (черные точки)

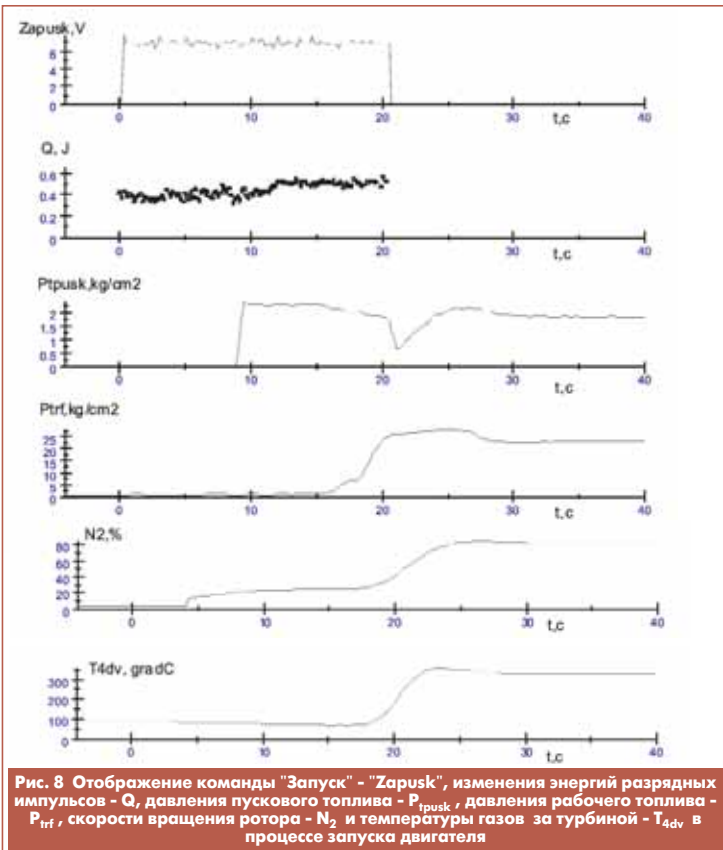


Рис. 8 Отображение команды "Запуск" - "Zapusk", изменения энергий разрядных импульсов - Q, давления пускового топлива - P_{tr} , давления рабочего топлива - P_{trf} , скорости вращения ротора - N_2 и температуры газов за турбиной - T_{4dv} в процессе запуска двигателя

дов с некоторой тенденцией роста к концу серии.

С этими графиками на рисунке 7, для сравнения, совмещен также график выделенных в разрядах энергий, который был получен в опыте предварительного автономного включения системы зажигания на холодном двигателе до его запусков. Сравнение показывает, что энергии разрядов при автономном включении зажигания колеблются в определенных пределах на всем протяжении серии около некоторого постоянного уровня, меньшего, чем энергии разрядов при штатном запуске двигателя.

Подобная форма регистрации и развертки ОГР в реальном времени развития процесса запуска позволяет совместить в единой циклограмме любую такую развертку с графиками изменения режимных параметров запуска двигателя, которые обычно записываются штатной АИИС стенда. В результате можно обнаружить объективные взаимосвязи и взаимовлияния режимов разрядов и режимов запуска. На рисунке 8 представлена такая совмещенная циклограмма для рассмотренного запуска двигателя. Из рассмотрения этой циклограммы можно, например, сделать следующие выводы:

- электрические разряды на свече зажигания следовали бесперебойно на протяжении всей команды "запуск";
- фаза заметного увеличения энергии разрядов и появления подготовительной стадии при них совпадает с фазой подачи пускового топлива и его воспламенением;
- длительность задержки воздействия пускового топлива на свечу после его подачи составляет около 2-х секунд;
- разряды на свечах зажигания прекращаются в момент достижения N_2 величины 50%;
- энергии разрядов на свече около 0,4 Дж оказалось достаточно для успешного воспламенения топлива и запуска двигателя.

Другой цикл исследований по диагностике разрядов был осуществлен при запусках вертолетного двигателя на стенде при имитации разнообразных высотно-климатических условий - по высоте полета 0...6,5 км, скорости полета 0...350 км/час, полной температуре воздуха на входе в двигатель и температуре топлива +48...-60 °С. В камере сгорания этого двигателя был предусмотрен прямой розжиг топливовоздушной смеси (ТВС) от полупроводниковой свечи, установленной непосредственно в жаровой трубе камеры, при накопленной энергии агрегата зажигания 6 Дж. Целью исследований ставилась оценка влияния условий запуска на ОГР, в том числе, и на нормальное функционирование агрегата зажигания. Из числа вторичных параметров анализировались энергия разряда Q и пробивное напряжение свечи

U_{max} , идентифицируемое, как наибольшая амплитуда напряжения в разрядном импульсе.

В качестве примера на рисунках 9 и 10 представлены результаты диагностики разрядов в одном из успешных запусков этого двигателя в условиях аэродрома на высоте 1,5 км при температурах -35 °С.

На графиках отчетливо видно явное увеличение энергии Q от уровня примерно 1,5 Дж, начиная с момента подачи топлива в форсунки, с достижением некоторого максимума 2,5 Дж и последующим некоторым спаданием её в конце серии разрядов до уровня 1,8 Дж несколько выше исходного. Видно, что в целом похожим образом ведет себя и пробивное напряжение U_{max} , достигая наибольшего значения 4,8 кВ.

Такое поведение параметров выражается также в виде заметного расщепления осциллограмм разрядных импульсов и значительного разброса первых пиков осциллограмм напряжения. Очевидной версией, объясняющей это поведение, как и в предыдущем описанном цикле исследований, является влияние жидкой или паровой фазы топлива в разрядной полости свечи на увеличение выделяемой энергии разряда и уровня пробивного напряжения. При этом обращает на себя внимание отличительный факт - отсутствие подготовительных стадий в разрядах, связанный с тем, что в данном агрегате зажигания имеется активатор (вспомогательный высоковольтный импульсный трансформатор), который облегчает условия пробы свечи зажигания.

В ряде других запусков проявлялось некоторое влияние снижения температуры воздуха до -60 °С на энергию разрядов, происходящих до подачи топлива в форсунки. Оно выражалось в тенденции незначительного увеличения этой энергии от 1,35 до 1,6 Дж, что, по-видимому, может быть связано с увеличением плотности воздуха.

В ходе этого же цикла испытаний диагностической системы при запусках были обнаружены случаи нарушения (перебоев) искрообразования на свече по признаку зафиксированных нулевых значений энергии у некоторого количества разрядов. Уровни напряжений этих разрядов оказывались близкими к нулю в силу различного рода шунтирования разрядного промежутка свечи. Один из таких случаев при наземном запуске в нормальных условиях отражен на рисунках 11 и 12.

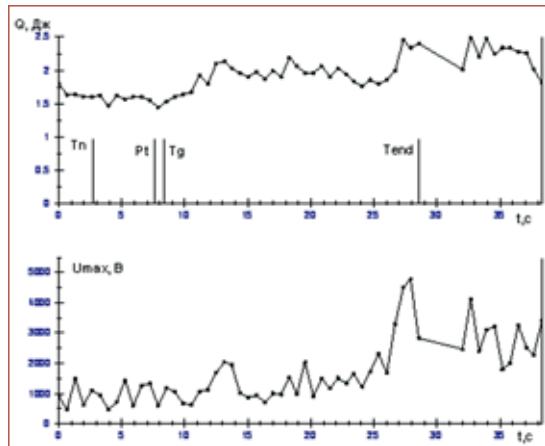


Рис. 9 Изменение энергий разрядов Q и пробивных напряжений U_{max} по времени при успешном запуске T_n - начало раскрутки ротора, P_t - начало подачи топлива в форсунки, T_g - момент воспламенения топлива, T_{end} - окончание автоматического включения СЗ и переход на ручное включение

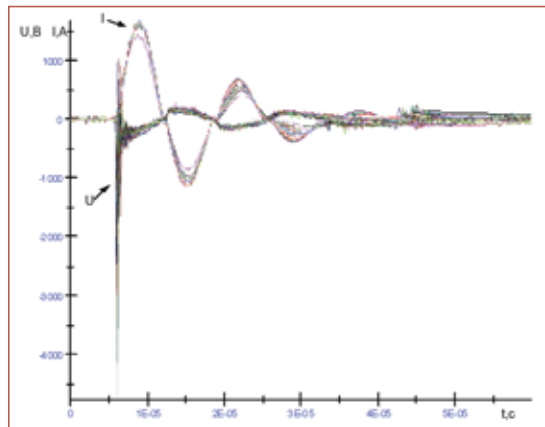


Рис. 10 Осциллограммы тока и напряжения разрядных импульсов при запуске по рисунку 9

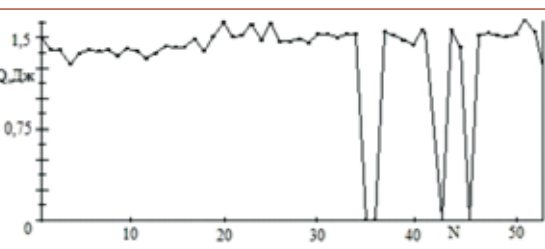


Рис. 11 Изменение энергии Q по порядковым номерам N следования разрядов при запуске с отдельными перебоями искрообразования

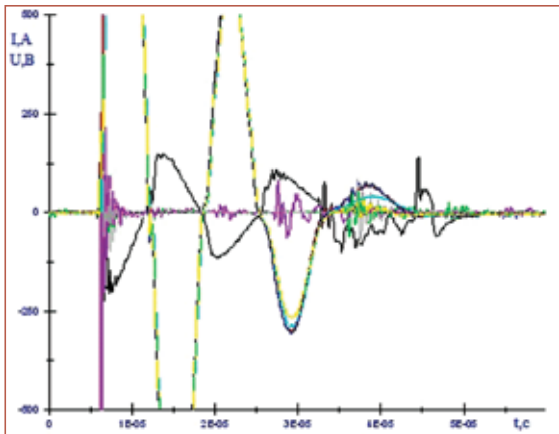


Рис. 12 Осциллограммы аномальных и нормального (черная кривая) разрядов

Эти иллюстрации показывают, что энергия четырех разрядов в их серии (№№ 35, 36, 42, 45) равна нулю, и как осциллограммы напряжения этих аномальных разрядов отличаются от осциллограммы нормального разряда № 32.

Одной из вероятных причин этих аномальных разрядов могло быть нерегулярное коксование межэлектродного зазора свечи.

Другой случай при условиях запуска двигателя в полете со скоростью 350 км/час на высоте 1,7 км при температуре воздуха на входе - 48°C и температуре топлива - 35°C отображен на рисунке 13.

Как видно из этой иллюстрации, здесь искрообразование непрерывно отсутствовало в большей части разрядов в начале их серии вплоть до 23-го разряда. Одной из возможных причин этого могло быть образование инея в хвостовике или на торце свечи вследствие захлаживания двигателя на стенде перед его запуском. Запуск двигателя все же произошел от другой свечи, которая видимо, оказалась в более благоприятных условиях. И когда после прогрева свеча высохла от инея, на ней возобновилось устойчивое искрообразование.

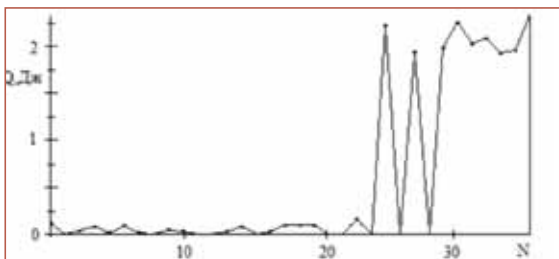


Рис. 13 Изменение энергии Q по порядковым номерам N следования разрядов при существенных сбоях искрообразования

В целом же, в ходе всех исследований агрегаты зажигания работали безотказно в нормальном режиме, о чем однозначно можно было судить по регистрировавшимся осциллограммам тока разрядных импульсов, которые соответствовали ожидаемым расчетным осциллограммам.

Обнаруженные в ходе проведенных исследований и частично описанные здесь зависимости, связи и корреляции параметров разрядных импульсов с условиями запуска и определенными фазами в его процессе, с состоянием потока ТВС в зоне свечи, с нормальной или аномальной работой АЗ и свечи сами по себе представляют большой интерес. Хотя в настоящее время они находят пока приближенные объяснения, но в будущем потребуют более детального изучения.

Следует отметить, что подобная комплексная информация относительно поведения разрядных импульсов на свечах зажигания при запусках двигателей в условиях стендов получена впервые исключительно благодаря применению данной СДР. И по результатам исследований можно считать, что на данном этапе основные базовые принципы построения этой системы совместно с её программным обеспечением в целом отработаны и апробированы в такой степени, которая позволяет эффективно её использовать уже на уровне её экспериментального образца. Поэтому данный экспериментальный образец СДР можно принять в качестве прототипа для создания более совершенной штатной системы диагностики как рабочего средства измерения.

Перспективы применения системы диагностики разрядов

Система диагностики разрядов может служить весьма ценным универсальным инструментом для мониторинга состояния и режимов работы систем зажигания и для всевозможных их исследований и испытаний на различных этапах их жизненного цикла, в особенности - в эксплуатации на двигателях. Система может быть востребована как отраслевыми НИИ, так и агре-

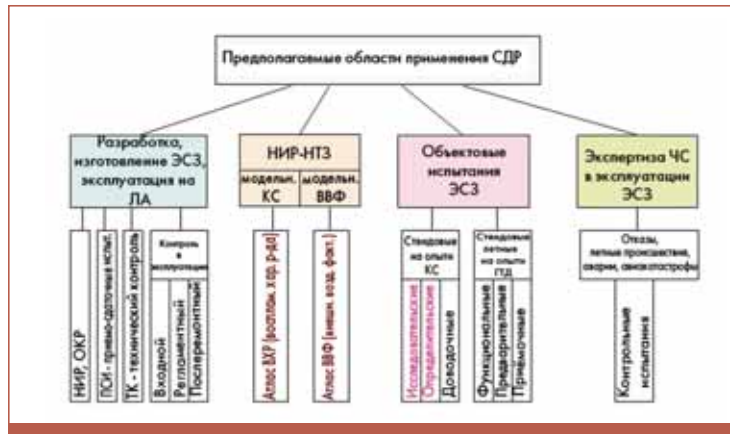


Рис. 14 Предполагаемые области применения СДР

гатными и моторными КБ и заводами в исследовательских целях, при разработках СЗ, их контроле, испытаниях и оснащении ими вновь разрабатываемых авиадвигателей. Более наглядно возможные области применения системы диагностики представлены в диаграмме на рисунке 14.

Отдельного пояснения требует показанная в диаграмме область применения "НИИР-НТЗ". Она предполагает проведение комплекса исследований, направленных на углубленное изучение закономерностей и условий успешного воспламенения в КС от определенных разрядных импульсов, а также обратного влияния режимов среды и потока ТВС на характеристики и устойчивость разрядов. На необходимость подобных исследований указывают результаты выше описанных экспериментов.

Одно из направлений предполагаемых НИИР - создание так называемого "Атласа воспламенительных характеристик разрядов" (Атласа ВХР) для некоторого множества отличающихся по своим параметрам, режимам и происхождению разрядов. Сама воспламенительная характеристика разряда (ВХР) в отдельности характеризует воспламеняющую способность данного разряда. Она представляет собой такую область параметров физического состояния потока ТВС в локальной зоне разряда, при которых этим разрядом возбуждается активный очаг воспламенения. Чем шире и протяженнее такая область, тем выше воспламеняющая способность разряда. Параметрами ТВС, описывающими такую параметрическую область, следует считать, прежде всего: давление p и скорость v воздуха, температуру воздуха $Tв$ и топлива $Tт$, концентрацию Θ и степень дисперсности δ топливной фазы; назовем их локальными параметрами (ЛП). Для любого разряда ВХР может быть экспериментально снята в условиях специальной модельной КС, где обеспечены возможности регулирования и измерения ЛП в месте разряда.

Другой составляющей предполагаемых НИИР является изучение влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ) на параметры электрических разрядных импульсов, качество искрообразования, работоспособность свечи зажигания. Под ВВФ здесь понимаются параметры рабочей среды в КС, которая воздействует на разрядный промежуток свечи и её конструкцию в целом во время запуска двигателя, на всех других режимах его работы на стоянке и в полете, а также - в перерывах между полетами. Поэтому, наряду с вышеупомянутыми локальными параметрами ТВС, имеются в виду и другие параметры среды, продуктов сгорания в экстремальных их сочетаниях и диапазонах, которые могут приводить, например, к увлажнению электродов свечи, образованию слоя инея, коксообразованию, термическим деформациям и другим неприятностям. Очевидно, что для конкретной конструкции свечи и определенного режима разрядных импульсов на ней, будут объективно существовать граничные величины отдельных параметров ВВФ или их сочетаний, за пределами которых будут нарушаться нормальные режимы разрядов и искрообразование в целом. Такие граничные величины ВВФ для различных свечей и режимов разрядов на них могут быть экспериментально определены в условиях соответствующих моделирующих установок в виде так называемого "Атласа граничных ВВФ".

Научно-технический задел, который может быть получен в результате означенных предполагаемых НИИР, позволит намного успешнее решать вопросы оптимизации систем зажигания, режимов смесеобразования в КС и других условий среды в ней для реализации эффективного и надежного запуска двигателей.

Наличие Атласа ВХР позволило бы выстроить и реализовать алгоритм

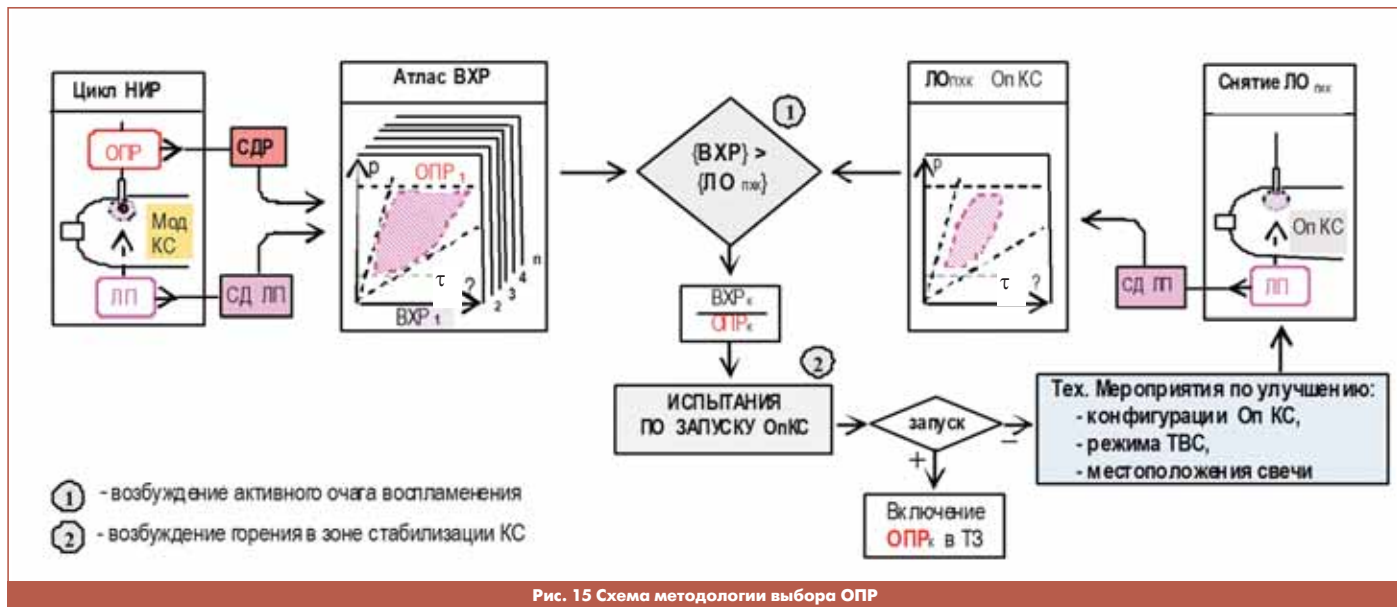


Рис. 15 Схема методологии выбора ОПР

выбора рациональных конфигураций СЗ для конкретных КС, двигателей. Конечной целью этого выбора следует считать нахождение такого конкретного сочетания определяющих параметров системы зажигания (ОПР_к), которое обеспечило бы надежное воспламенение в данной КС во всей области её заданной пусковой характеристики на всех режимах запуска, а также одновременно определило бы и наилучшие из возможных энергетические и эксплуатационные показатели СЗ - потребляемую мощность, габариты, массу, надежность, ресурс. Схема методологии такого выбора для некоторой разрабатываемой КС показана на рисунке 15.

Как видно из этой схемы, для реализации методологии, помимо Атласа ВХР, снимаемого на модельной КС, потребуется некая характеристика разрабатываемой КС, названная ЛО_{пк} - локальное отображение пусковой характеристики камеры сгорания. Сама пусковая характеристика камеры сгорания (ПХК) задается обычно параметрами подачи воздуха и топлива исключительно в местах входа в КС. Характеристика же ЛО_{пк} представляет собой такую область локальных параметров потока ТВС в зоне разряда, которая формируется в результате реального воспроизведения всех режимов запуска КС в пределах заданной её ПХК. Характеристика ЛО_{пк} может быть экспериментально снята на опытном образце разрабатываемой камеры сгорания (Оп КС) с использованием комплекса аппаратуры, названной на схеме СД ЛП - система диагностики локальных параметров.

Алгоритм выбора ОПР предполагает двухшаговую операцию. Первый шаг, отображенный на схеме - это анализ ВХР, имеющихся в Атласе, их сравнение с характеристикой ЛО_{пк} и сепарация по признаку $(ВХР) > (ЛО_{пк})$. Это означает, что каждый режим разряда из числа отсепарированных по ВХР способен обеспечить первую стадию запуска КС - возбуждение активного очага воспламенения. Затем из этого числа приемлемых режимов разрядов может быть выбран по принятым критериям некий режим под индексом "к" в Атласе с соответствующим ему сочетанием определяющих параметров ОПР_к, который при том обеспечит наилучшие энергетические и эксплуатационные показатели СЗ.

Второй шаг алгоритма, отображенный на схеме, предусматривает проведение проверочных испытаний по запуску опытной КС при выбранном режиме разрядов с ОПР_к когда должна подтверждаться реализация второй стадии запуска (розжига) КС - возбуждение устойчивого горения в зоне стабилизации КС на всех требуемых режимах запуска. В случае положительного результата этих проверочных испытаний выбранный "к" режим разряда и соответствующие ему ОПР_к принимаются к внедрению на данной КС и включаются в ТЗ на разработку СЗ.

В противном случае проводятся необходимые технические мероприятия по улучшению устройства КС, которые указаны на схеме, и описанный двухшаговый цикл выбора повторяется вновь.

Обобщая опыт и результаты данных исследований в целом, можно сформулировать нижеследующие выводы и рекомендации.

1. Созданная экспериментальная система диагностики разрядов (СДР) прошла успешную апробацию в ходе стендовых испытаний ряда авиодвигателей.

2. Подтверждено, что система с достаточной точностью обеспечивает измерение величин определяющих параметров разрядов (ОПР) в диапазонах, характерных для подавляющего большинства эксплуатируемых и ожидаемых к разработке емкостных систем зажигания (СЗ).

3. Система позволяет оперативно в ходе запуска двигателя регистрировать и представлять в наглядной форме все ОПР с идентификацией каждого из разрядных импульсов в их полной серии и временной последовательности.

4. Система, как средство измерения, может служить универсальным инструментом для мониторинга разрядных процессов в системах зажигания на различных этапах их жизненного цикла - в исследовательских целях, при их разработке, контроле, испытаниях и оснащении ими вновь разрабатываемых двигателей.

5. Представляется целесообразным создать и внедрить в промышленность в качестве сертифицированного рабочего средства измерения штатную систему диагностики разрядов, прототипом которой следует принять данный экспериментальный образец СДР.

6. Посредством СДР следует осуществить цикл специальных НИР по созданию Атласа воспламенительных характеристик разрядов и Атласа граничных внешних воздействующих факторов, которые должны быть положены в основу рациональной методологии формирования надлежащих пусковых характеристик КС и выбора оптимальной конфигурации СЗ в перспективных разработках.

7. В целях преодоления существующих организационных препятствий к использованию ОПР и внедрению СДР в промышленность следует осуществить переработку ныне действующих нормативных документов по СЗ, чтобы ввести ОПР в категорию нормируемых параметров СЗ и регламентировать определенную процедуру их выбора при новых разработках камер сгорания, двигателей. **П**

Литература

1. Кюрегян Н.С., Голенцов Д.А. и др. Диагностика разрядов на свечах зажигания авиационных газотурбинных двигателей // Мир измерений, 12 (130), 2011, с. 21-25.
2. Кюрегян Н.С., Голенцов Д.А., Фланден В.С. Особенности регистрации сигналов и обработки данных при диагностике параметров разряда свечей зажигания газотурбинных двигателей // Автоматизация в промышленности, 10, 2015, с. 36-38.
3. Кюрегян Н.С., Голенцов Д.А., Фланден В.С. Экспериментальное исследование импульсов на свече зажигания газотурбинных двигателей с помощью автоматизированной системы диагностики при стендовых испытаниях // Автоматизация в промышленности, 10, 2018, с. 29-31.

Связь с авторами: dep010@ciam.ru