

На правах рукописи

САЛИХОВ Ренат Мунирович

**ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ
ЗАЖИГАНИЯ ГТД**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре электрооборудования летательных аппаратов и наземного транспорта.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гизатуллин Фарит Абдулганеевич
кафедра электрооборудования летательных аппаратов и наземного транспорта
Уфимского государственного авиационного технического университета

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Григорьевич
кафедра электромеханики и электромеханических систем
Южно-Уральского государственного университета

доктор технических наук, профессор
Рогинская Любовь Эммануиловна
кафедра электромеханики
Уфимского государственного авиационного технического университета

Ведущее предприятие: ФГУП «Уфимское агрегатное производственное объединение»

Защита состоится 20 мая 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан 06 апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

В.С. Фетисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Значительный рост скоростей и высот полета, увеличение мощности двигателей приводят к усложнению функций, выполняемых летательными аппаратами и ужесточению требований, предъявляемых к силовым установкам, что вызывает необходимость совершенствования электрических систем зажигания и поиска новых решений, направленных на повышение их эффективности.

Вопросы повышения эффективности авиационных систем зажигания освещены во многих работах отечественных и зарубежных авторов. Среди них следует особо выделить труды И.М. Синдеева, В.А. Балагурова, В.П. Ураева, Р.Ш. Вахитова, Ф.А. Гизатуллина, В.Н. Гладченко, Л.И. Алимбекова, О.А. Попова, А.В. Краснова, А.Н. Мурысева, В.Д. Опескина, А. Лефевра, Дж.Р. Фруса, К.К. Света, В.М. Куляпина, В.Х. Абдрахманова, И.Х. Байбурина, К.В. Зиновьева, А.В. Лобанова, З.Г. Габидуллиной и др.

В последнее время ведутся разработки плазменных систем зажигания ГТД, предполагающих использование специальных мощных источников питания. 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.

Плазменные системы зажигания в настоящее время считаются перспективными, однако целый ряд вопросов, связанных с эффективностью их применения, остается открытым. К их числу относятся следующие. Устойчивость электроразрядных процессов в силовых цепях в условиях высотного запуска ГТД в полной мере не изучена. Для решения этой задачи необходима, в том числе, разработка специального стенда, имитирующего условия образования дугового разряда в свечах в зависимости от режима запуска двигателей ГТД. Также в известной научно-технической литературе не представлены сведения по исследованию влияния параметров разрядных цепей осцилляторов на устойчивость дугообразования в свечах. Несмотря на широкие возможности современных информационных технологий, при исследовании процессов в плазменных системах зажигания компьютерные модели в полной мере не используются.

Таким образом, проведение исследований, направленных на анализ устойчивости электроразрядных процессов в плазменных свечах, разработку плазменных систем зажигания на основе неиспользуемых возможностей повышения их эффективности, внедрение информационных технологий в процесс разработки, создание экспериментальной установки по исследованию

устойчивости дугообразования в плазменных системах зажигания с имитацией различных режимов запуска ГТД, в настоящее время является актуальным.

Цель диссертационной работы: Исследование закономерностей электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания постоянного тока, развитие теоретических основ проектирования систем зажигания.

Задачами диссертации являются:

1. Разработка алгоритма определения режима работы осциллятора в составе плазменных систем зажигания в напряженных условиях высотного запуска ГТД.

2. Разработка алгоритма определения предельно допустимой скорости плазмообразующего воздуха через плазменную свечу в зависимости от параметров силовой цепи, при которых обеспечивается устойчивость электроразрядных процессов.

3. Моделирование электроразрядных процессов в плазменной системе зажигания, в том числе, с учетом газодинамических параметров в камерах сгорания ГТД.

4. Разработка стенда по исследованию устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания, экспериментальное подтверждение разработанных моделей.

5. Разработка схемотехнических решений плазменных систем зажигания повышенной эффективности.

Методы исследований. При выполнении работы для решения поставленных задач использовались методы математического анализа, компьютерного моделирования, осциллографический метод экспериментальных исследований. Моделирование на ЭВМ производилось в программной среде Matlab 6.5, с использованием библиотеки Simulink и SimPowerSystems.

На защиту выносятся:

1. Алгоритм определения режима работы осциллятора в составе плазменных систем зажигания в напряженных условиях высотного запуска ГТД, способствующих гашению дугового разряда в плазменной свече.

2. Алгоритм определения предельно допустимой скорости плазмообразующего воздуха через плазменную свечу в зависимости от параметров силовой цепи, при которых обеспечивается устойчивость электроразрядных процессов.

3. Компьютерные модели плазменной системы зажигания постоянного тока.

4. Результаты разработки экспериментального стенда по исследованию устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания постоянного тока в зависимости от различных режимов запуска ГТД.

5. Результаты разработки новых схемотехнических решений плазменных систем зажигания, а также комбинированного измерителя динамических и статических пробивных напряжений плазменных свечей.

Научная новизна и достоверность результатов:

1. Впервые разработан алгоритм определения режима работы осциллятора в составе плазменных систем зажигания на основе анализа времени гашения дугового разряда в напряженных условиях высотного запуска ГТД.

2. Впервые разработан алгоритм определения предельно допустимой скорости плазмообразующего воздуха через плазменную свечу, являющийся основой для расчета требуемых параметров плазменных систем зажигания.

3. В разработанной имитационной компьютерной модели плазменной системы зажигания постоянного тока учтены не только электрические процессы, но и газодинамические параметры, определяющие работоспособность плазменной системы зажигания.

4. Достоверность результатов исследований подтверждена экспериментально на разработанном с участием автора стенде по исследованию устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания с имитацией различных режимов запуска авиационного ГТД.

5. Разработанные схемотехнические решения, являющиеся основой для разработки новых высокоэффективных плазменных систем зажигания, защищены патентами на полезные модели (№. 74667, №86251, №94640, №99829).

Практическая ценность и внедрение результатов.

1. Результаты работы позволяют в первом приближении решать практические задачи исследования, расчета и проектирования плазменных систем зажигания с учетом параметров, характеризующих различные режимы запуска ГТД.

2. Предложенные схемотехнические решения, защищенные патентами, являются основой для разработки новых высокоэффективных плазменных систем зажигания.

3. Разработанные с участием автора электротехнические узлы экспериментального стенда по исследованию устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания с имитацией различных режимов высотного запуска ГТД внедрены в ФГУП УАПО.

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс в УГАТУ для студентов специальности 140609 “Электрооборудование летательных аппаратов”.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на следующих научно-технических конференциях всероссийского уровня:

- Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Уфа, 2008
- Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. Уфа, 2009
- Актуальные проблемы науки и техники. Уфа, 2010.

- Актуальные проблемы науки и техники. Уфа, 2010.

Публикации по теме диссертации. Список публикаций автора по теме диссертации включает 13 научных трудов, в том числе 1 статья в рецензируемом научном журнале из списка ВАК (8 с.); 4 патента на полезные модели; 4 статьи в сборниках научных трудов (21 с.); 4 публикации в трудах конференций всероссийского уровня (10 с.), из них одна публикация выполнена без соавторов (2 с.).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Общий объем составляет 142 страницы, 59 рисунков, 3 таблицы. Список литературы включает 109 наименований и занимает 11 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ перспектив совершенствования систем зажигания. Отмечено, что представляет интерес практическое использование ряда новых научно-технических разработок в области совершенствования систем зажигания, в том числе, использование импульсно-плазменных систем зажигания, разработка и внедрение управляемых систем зажигания, в которых выходные параметры зависят от условий высотного запуска двигателей, развитие и совершенствование плазменных систем зажигания (ПСЗ).

Проведен сравнительный анализ схем построения ПСЗ постоянного и переменного тока. На основе анализа возможных схем построения определено, что в качестве источников питания целесообразно использование инверторных источников питания, в том числе, источников питания с резонансными контурами.

Отмечено, что устойчивость дугообразования в силовых цепях ПСЗ исследована недостаточно, особенно в части согласования внешних характеристик источников и вольтамперных характеристик дугового разряда, с учетом изменения газодинамических параметров в камерах сгорания на различных режимах запуска ГТД.

Проведенный анализ показал, что в научно-технической литературе отсутствуют сведения об оптимизации режимов работы осцилляторов в составе ПСЗ, отсутствует теоретическое обоснование минимально необходимой частоты следования ионизирующих импульсов для повторного зажигания дугового разряда в свече в условиях, приводящих к гашению разряда.

Отмечено, что в ходе разработок, проектирования и исследования ПСЗ возможности современных компьютерных технологий используются не в полной мере, отсутствуют модели, позволяющие обосновывать выбор параметров силовых цепей и осцилляторов на стадиях разработки, проектирования, испытания и доводки ПСЗ.

Эффективность ПСЗ определяется рядом факторов, к которым, кроме воспламеняющей способности, относится устойчивость дугообразования в свечах в напряженных условиях высотного запуска ГТД на режимах авторотации и встречного запуска. Для исследования устойчивости дугообразования необходим специализированный стенд, позволяющий имитировать реальные условия, имеющие место на режимах высотного запуска ГТД.

Проведенный анализ показал, что в применяемых ПСЗ не реализуется известный метод повышения эффективности систем зажигания, основанный на сочетании в свечах маломощного длительного разряда с мощным коротким разрядом емкостного типа.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена моделированию процессов в ПСЗ постоянного тока, разработке схмотехнической и аналитической имитационной компьютерных моделей.

В применяемых ПСЗ для обеспечения устойчивой работы при нестационарном горении дуги, при колебаниях падения напряжения в дуге используется токовая стабилизация, которая реализуется различными способами, однако токовая стабилизация, оправданная при разработке плазменных систем зажигания, ограничивает возможности решения исследовательских задач, направленных на анализ различных режимов работы ПСЗ. Поэтому для исследований в диссертационной работе за основу взята схема, структура которой приведена на рис.1.

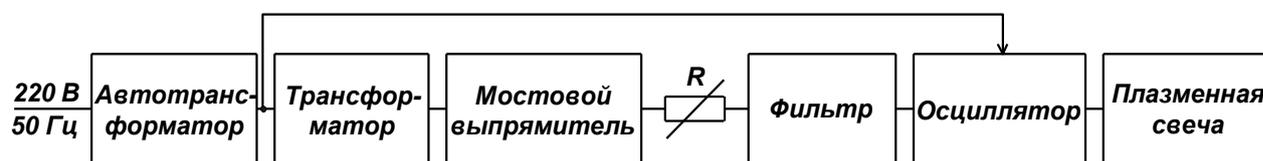


Рисунок 1 – Структурная схема макета плазменной системы зажигания постоянного тока

Данная схема позволяет варьировать в широких пределах все параметры силовой цепи и осциллятора, отвечающие за эффективность процессов в плазменных свечах.

Первая решенная задача направлена на определение режима работы осциллятора, обеспечивающего эффективное повторное зажигание дуги после нарушения устойчивости горения дуги под действием различных дестабилизирующих факторов.

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.

На основе анализа уравнения баланса напряжений в переходном режиме гашения дуги и решения для закона изменения тока получено выражение для времени гашения дугового разряда:

$$t_e = \frac{L}{R} \ln \frac{U_\delta(i)}{U_\delta(i) - U_0}, \quad (1)$$

где L, R – индуктивность и активное сопротивление силовой цепи; U_0 – максимальное напряжение на выходе источника питания; $U_\delta(i)$ – падение напряжения в дуговом разряде.

Падение напряжения $U_\delta(i)$ можно описать разными способами, в работе для описания падения напряжения используется известное обобщенное уравнение вольт-амперной характеристики воздушной дуги для токов до 30А:

$$U_\delta(i) = 305 \left(\frac{I^2}{G_{en} d_1} \right)^{-0,12} \left(\frac{G_{en}}{d_1} \right)^{0,08} \left(\frac{l_1}{d_1} \right)^{0,56} (pd_1)^{0,20}, \quad (2)$$

где G_{en} – расход плазмообразующего воздуха, кг/с; l_1 и d_1 – длина и диаметр дугового канала; p – давление на выходе дугового канала.

Также используется известное эмпирическое выражение:

$$U_\delta(i) = \frac{cl}{I^a} (10^{-5}) p^e, \quad (3)$$

где I – ток через дугу; c, e – постоянные коэффициенты; a – показатель степени, характеризующий крутизну вольтамперной характеристики дуги; $l = f(\delta, V)$ – длина дуги, зависящая, в основном, от междуэлектродного зазора δ и скорости потока воздуха V в зоне дугового разряда.

В результате моделирования для требуемой мощности осциллятора с целью поддержания дугового разряда получено выражение:

$$P \geq \frac{CU_1^2 R}{2\eta L \ln \frac{U_\delta(i)}{U_\delta(i) - U_0}} \quad (4)$$

где C – емкость накопительного конденсатора; U_1 – напряжение пробоя разрядника; η – коэффициент, учитывающий потери в зарядной и разрядной цепях; падение напряжения в дуговом разряде $U_\delta(i)$ определяется на основании выражений (2), или (3) 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 системы зажигания 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 режим работы

осциллятора и напряжение источника питания силовой цепи будут меняться по заданной программе в зависимости от условий запуска двигателей.

Применительно к принципиальной схеме макета ПСЗ постоянного тока (рис. 2) в среде Matlab разработана схемотехническая модель, показанная на рис. 3.

В ходе схемотехнического моделирования приняты следующие основные допущения:

1. Разрядник представлен в виде идеального ключа.
2. Влияние источника питания на разрядные процессы в осцилляторе не учитывается, так как длительность заряда накопительного конденсатора до момента пробоя разрядника значительно превышает длительность разрядного процесса.
3. Длительность горения дуги не задается в зависимости от условий гашения дуги; для целей исследований важно только время гашения дуги.
4. Свеча заменена линейным резистором.

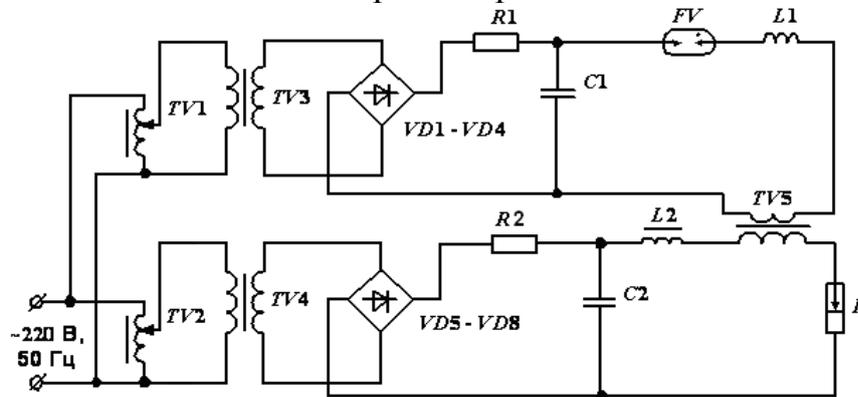


Рисунок 2 – Принципиальная схема макета плазменной системы зажигания

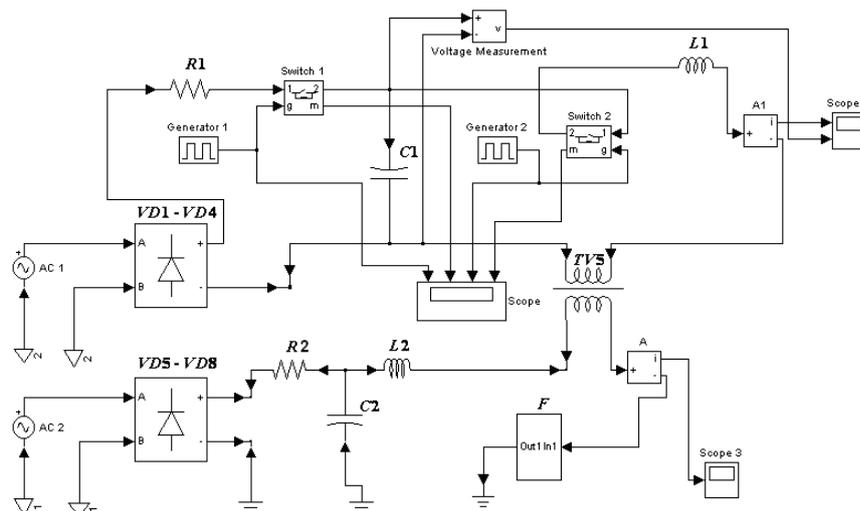


Рисунок 3 – Схемотехническая модель ПСЗ постоянного тока

Полученная модель позволяет анализировать процессы в силовой цепи и осцилляторе в широком диапазоне изменения параметров элементов схемы.

Разработан подход для анализа устойчивости электроразрядных процессов в ПСЗ в зависимости от параметров силовой цепи, скорости

плазмообразующего воздуха через свечу и давления на входе в камеру сгорания.

Для решения этой задачи принято, что падение напряжения в дуговом разряде состоит из двух составляющих: падения напряжения при нулевой скорости плазмообразующего воздуха и приращения падения напряжения за счет обдува дуги плазмообразующим воздухом. На основе аппроксимации известных экспериментальных данных полное падение напряжения в дуговом разряде для критического режима минимально устойчивого горения дуги имеет вид:

$$U_0 = \frac{cl}{I_{кр}^a} (10^{-5}) p^e + AV_{max}, \quad (5)$$

где $I_{кр}$ – ток, соответствующий критическому режиму; $A = 7,33 \frac{В \cdot с}{м}$ – постоянный коэффициент; V_{max} – максимально допустимая скорость плазмообразующего воздуха.

В результате моделирования, с учетом вида внешней характеристики источника питания, получено выражение для определения максимально допустимой скорости плазмообразующего воздуха, соответствующей минимально устойчивому режиму горения дуги в плазменной свече при заданном давлении воздуха в камере сгорания:

$$V_{max} = \frac{U_0 - a+1\sqrt{clp^e} (a+1)\left(\frac{U_0}{aI_0}\right)^{\frac{a}{a+1}}}{A}, \quad (6)$$

где I_0 – ток короткого замыкания; a – показатель степени, характеризующий крутизну вольтамперной характеристики дуги.

Разработанный алгоритм определения предельно допустимой скорости плазмообразующего воздуха является основой для анализа устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания в зависимости от параметров силовой цепи системы зажигания и давления на входе в камеру сгорания.

Для разработки аналитической имитационной компьютерной модели применительно к схеме, показанной на рис. 2, составлена система уравнений, на основе которой определена замкнутая система звеньев, описывающая логику работы аналитической имитационной модели, разработанной в среде Matlab, в соответствии с известной технологией моделирования (рис.4).

Кроме того, во второй главе в результате сравнительного исследования эффективности импульсно-плазменной системы зажигания и импульсной емкостной системы зажигания подтверждена возможность использования известного для классических импульсных емкостных систем зажигания показателя воспламеняющей способности для оценки эффективности импульсно-плазменных систем зажигания.

Анализ возможных схем построения импульсно-плазменных систем зажигания показал, что они, в основном, являются низковольтными, что является препятствием для использования свечей зажигания с искровым

промежутком. С участием автора разработана схема импульсно-плазменной системы зажигания повышенной эффективности (патент № 74667).

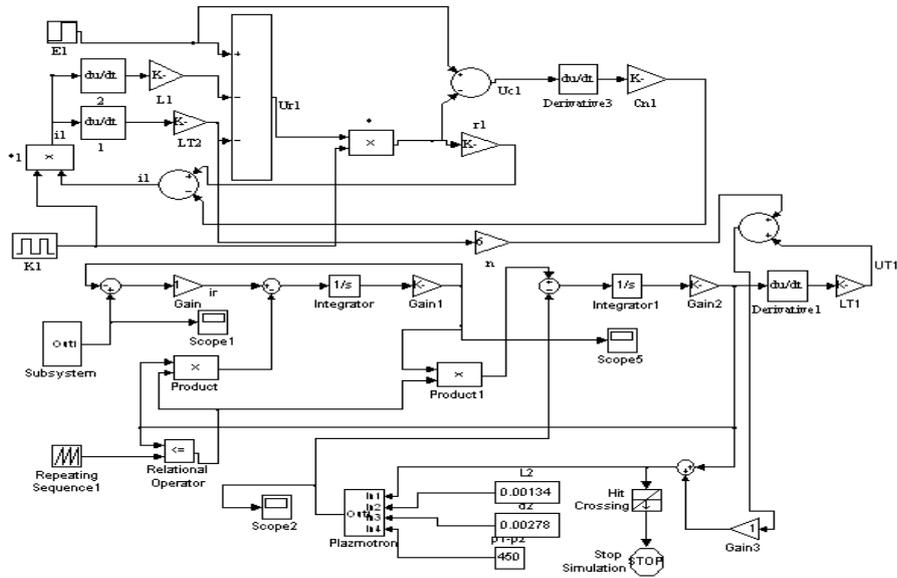
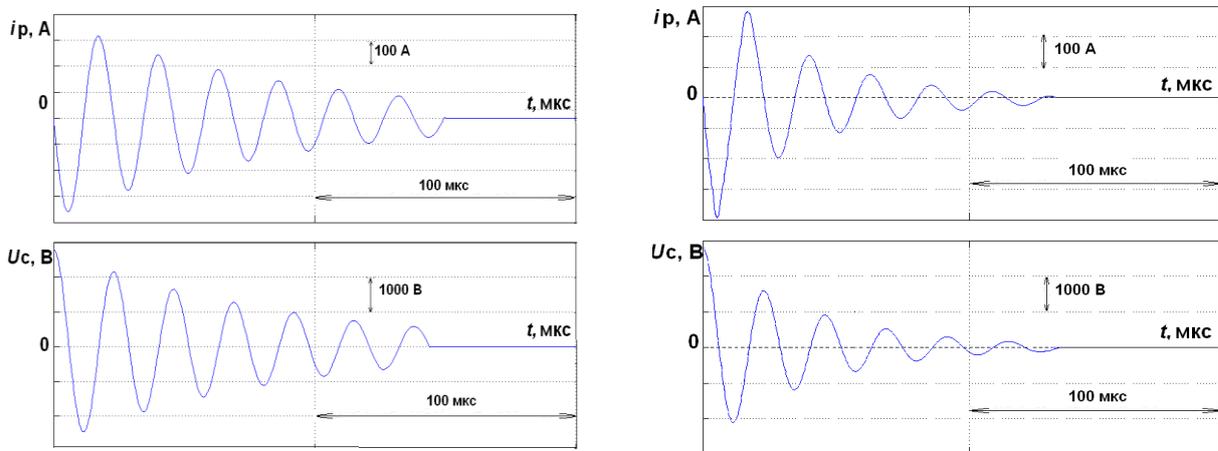


Рисунок 4 – Аналитическая имитационная модель ПСЗ постоянного тока

Третья глава посвящена исследованию закономерностей электроразрядных процессов в ПСЗ постоянного тока на основе созданных компьютерных моделей, а также разработке оригинальных схем подключения осцилляторов.

Применительно к осциллятору теоретически исследованы зависимости $I_p(t)$, $U_c(t)$ в широком диапазоне изменения параметров разрядной цепи осциллятора ($C1 = 0,1 - 1 \text{ мкФ}$, $L1 = 5 - 26,5 \text{ мкГн}$), по которым определены основные характеристики разрядной цепи: $I_m = f(L, C)$, $t_n = f(L, C)$, где I_m – амплитуда разрядного тока, t_n – длительность разрядного импульса. На рис. 5 представлены характерные зависимости $I_p(t)$, $U_c(t)$, полученные при исследовании компьютерных моделей при $C1 = 0,5 \text{ мкФ}$, $L1 = 26,5 \text{ мкГн}$.



а) Схемотехническое моделирование

б) Аналитическое имитационное моделирование

Рисунок 5 – Зависимости $I_p(t)$, $U_c(t)$ после пробоя разрядника

Применительно к силовой цепи ПСЗ исследованы зависимости силового тока $I_d(t)$ во время гашения разряда в свече при различных параметрах схемы.

На основании теоретических результатов, связанных с определением режима работы осциллятора, рассчитаны требуемая мощность осциллятора и необходимая частота следования разрядных импульсов при заданных параметрах силовой цепи.

По результатам анализа эффективности традиционной схемы подключения осциллятора в ПСЗ разработаны оригинальные схемы подключения осцилляторов в составе ПСЗ (рис.6), на которые получено два патента на полезные модели.

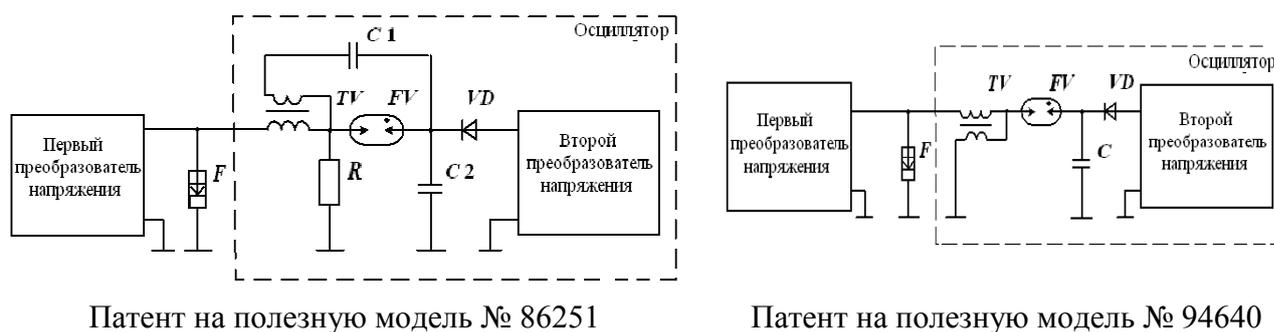


Рисунок 6 – Новые схемы подключения осцилляторов в составе ПСЗ

Представленные схемы обеспечивают образование в плазменной свече мощной емкостной стадии разряда, что, как известно, приводит к повышению воспламеняющей способности систем зажигания.

В четвертой главе представлены результаты физического моделирования и исследования процессов в ПСЗ постоянного тока.

Разработанный с участием автора специалистами УГАТУ и ФГУП УАПО экспериментальный стенд предназначен для проверки работоспособности плазменных свечей зажигания, плазменных агрегатов зажигания, для исследования устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания в условиях, приближенных к реальным при запуске ГТД на различных режимах.

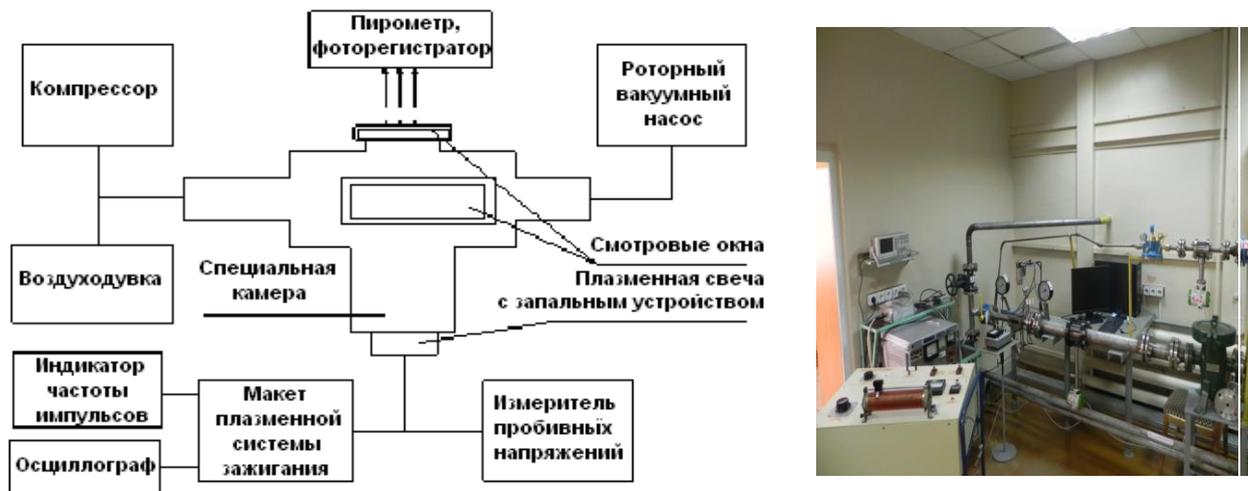
Структурная схема экспериментального стенда, включающего электротехническую и газодинамическую части, показана на рис. 7а. На рис.7б представлена фотография экспериментального стенда.

В экспериментальном стенде с определенной степенью приближения имитируются условия работы плазменных свечей в специальной камере без подачи и воспламенения топливовоздушной смеси при запуске ГТД в следующих режимах:

- наземный (стартовый) запуск;
- высотный запуск на режиме авторотации двигателя;
- высотный встречный запуск двигателя.

Специальная камера, в которой располагается плазменная свеча с запальным устройством, представляет собой прямой цилиндрический канал, через который проходит сносящий поток воздуха, с двумя смотровыми

окнами для визуального наблюдения, оптической пирометрии и фоторегистрации плазменного выброса. Плазменная свеча с запальным устройством, через которые проходит плазмообразующий воздух, располагается перпендикулярно оси камеры.



а) Структурная схема экспериментального стенда

б) Фотография экспериментального стенда

Рисунок 7 – Экспериментальный стенд по исследованию эффективности плазменных систем зажигания

Одной из задач при создании универсального экспериментального стенда являлось исследование пробивных напряжений плазменных свечей при изменении рабочих зазоров и давления среды на различных режимах запуска двигателей. Для этой цели разработан комбинированный измеритель динамических и статических пробивных напряжений, схема которого приведена на рис.8.

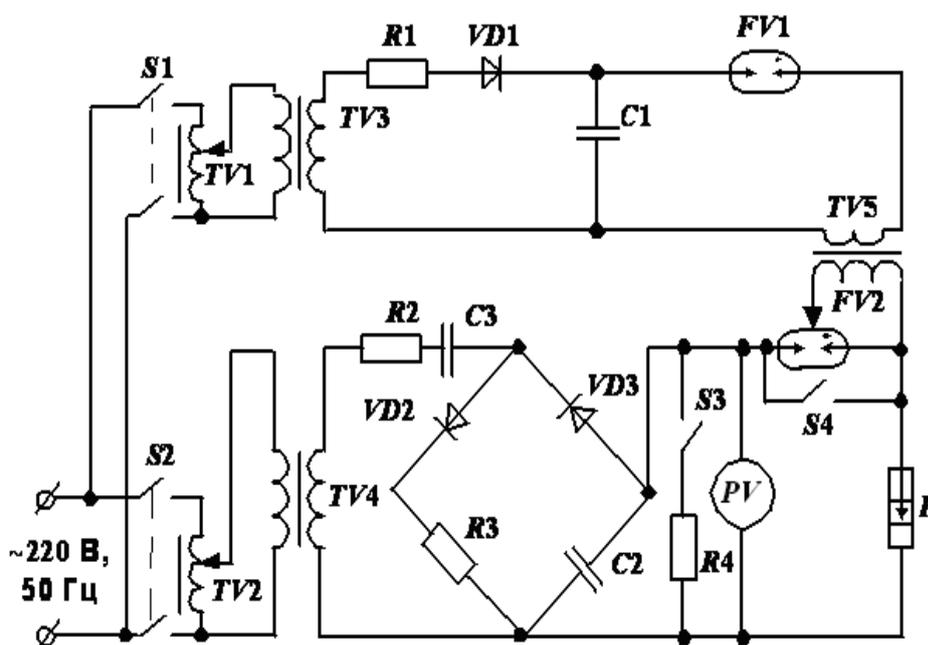


Рисунок 8 – Принципиальная схема комбинированного измерителя пробивных напряжений

В ходе экспериментальных исследований менялись следующие параметры макета плазменной системы зажигания постоянного тока: частота следования разрядных импульсов осциллятора (0,5 – 40 имп./с); емкость накопительного конденсатора осциллятора (0,1 – 1 мкФ); индуктивность разрядной цепи осциллятора (5 – 26,5 мкГн); активное сопротивление силовой цепи (7,5 - 200 Ом). Максимальное напряжение на выходе источника питания силовой цепи составляло 600 В. Индуктивность силовой цепи – 0,182 Гн. Пробивное напряжение разрядника в цепи осциллятора – 2,8 кВ.

При проведении экспериментов менялось также давление в специальной камере ($7,09 \cdot 10^4 - 2,75 \cdot 10^5$ Па).

Фиксировались следующие зависимости: разрядный ток осциллятора $I_p(t)$; напряжение на накопительном конденсаторе $U_c(t)$; ток в силовой цепи $I_d(t)$, соответствующий времени гашения дугового разряда; регистрировалась также частота следования разрядных импульсов осциллятора.

Совмещенные осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе и разрядного тока в цепи осциллятора при $C1 = 1,0$ мкФ, $L1 = 11,2$ мкГн, $f = 0,55$ имп./с показаны на рис. 9а. На рисунке 9б представлены соответствующие осциллограммы, полученные в результате исследований компьютерных моделей при тех же значениях параметров осциллятора.

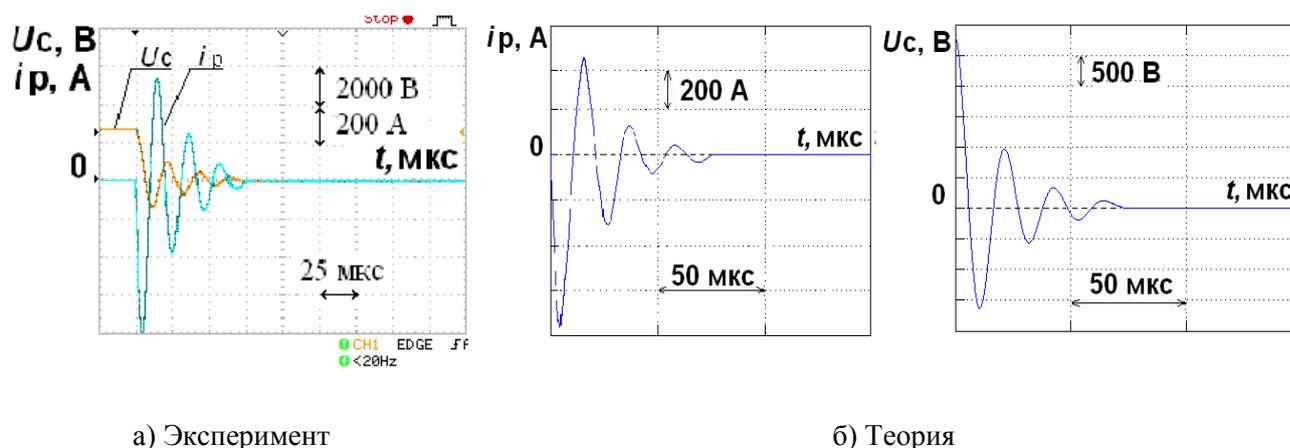
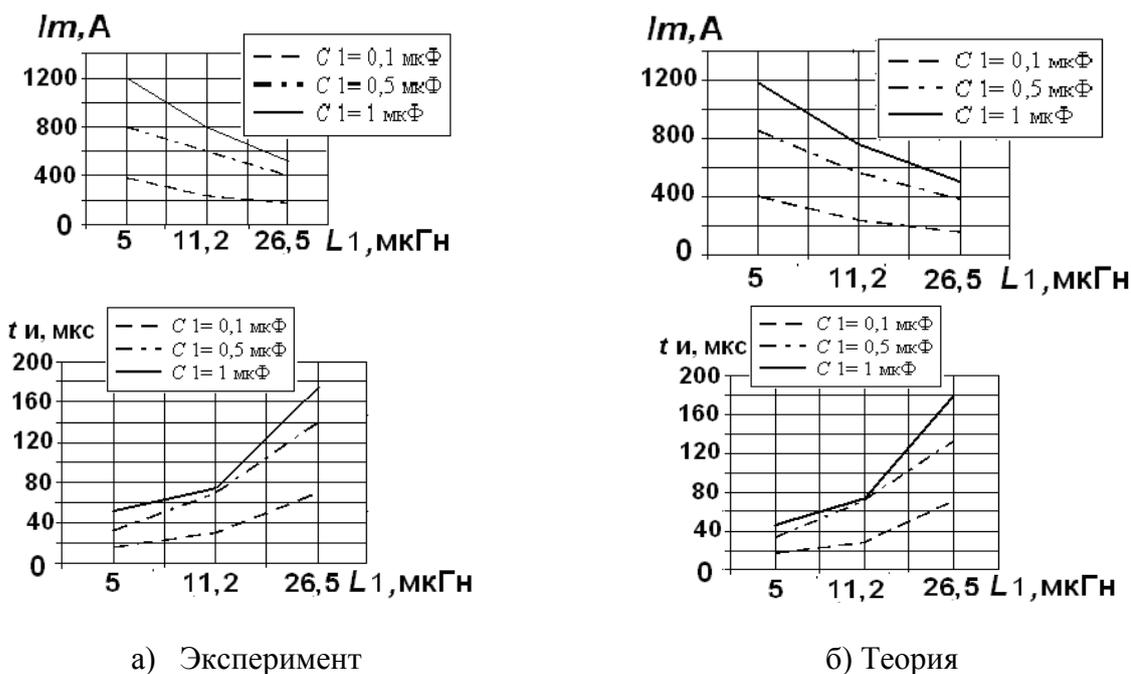


Рисунок 9 – Осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе и разрядного тока в цепи осциллятора

На рис. 10а приведены полученные в результате обработки экспериментальных данных зависимости $I_m = f(L, C)$, $t_{и} = f(L, C)$. На рис. 10б представлены соответствующие зависимости, полученные в результате теоретических исследований аналитической имитационной компьютерной модели при тех же значениях емкости накопительного конденсатора осциллятора.

Сравнение показало, что расхождение между теоретическими и экспериментальными зависимостями не превышает 15%, что подтверждает адекватность разработанных моделей.

Рисунок 10 – Зависимости $I_m = f(L, C)$, $t_n = f(L, C)$

На рис. 11а показана характерная осциллограмма тока $I_d(t)$ через серийную плазменную свечу, соответствующая времени гашения разряда при давлении $P = 2,33 \times 10^5$ Па в специальной камере газодинамической части стенда. На рис. 11б представлена соответствующая осциллограмма тока, полученная в результате исследований компьютерных моделей при тех же параметрах силовой цепи.

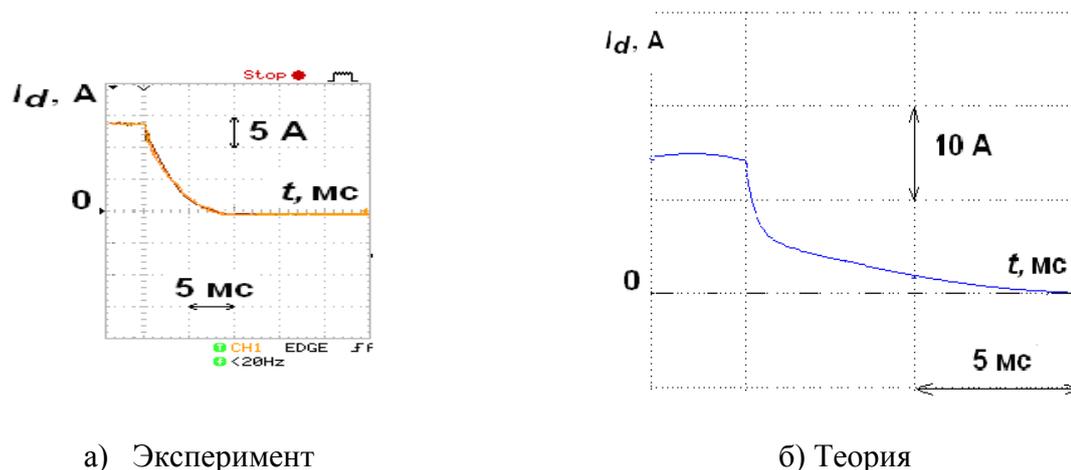
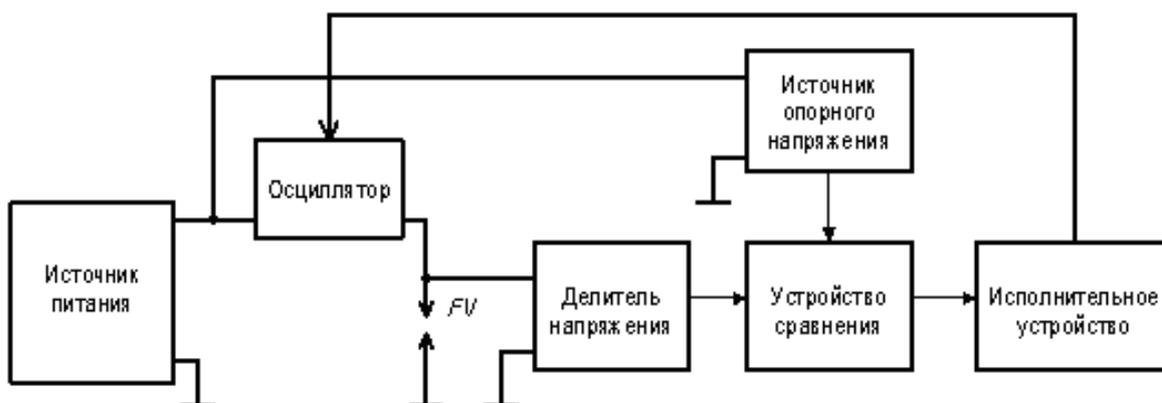


Рисунок 11 – Осциллограммы силового тока через плазменную свечу, соответствующие времени гашения разряда

Экспериментально полученная длительность гашения дуги и длительность гашения, определенная по результатам компьютерного моделирования при прочих равных параметрах отличаются более, чем на 30%; значительное расхождение между теоретическим и экспериментальным

результатами в данном случае является неизбежным, т.к. в ходе теоретических исследований вольт-амперная характеристика электрической дуги может быть представлена только в упрощенном виде с неполным учетом многих дестабилизирующих факторов.



Патент на полезную модель №99829

Рисунок 12 – Управляемая плазменная система зажигания

На основании результатов исследований разработана структурная схема управляемой ПСЗ, в которой осциллятор включается только при рассогласовании вольт-амперной характеристики дуги и внешней характеристики источника питания (рис.12), защищенная патентом на полезную модель.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Впервые разработан алгоритм определения режима работы осциллятора в составе плазменных систем зажигания на основе анализа времени гашения дугового разряда в напряженных условиях высотного запуска ГТД, позволяющий рассчитывать минимальную требуемую мощность осциллятора для обеспечения устойчивого дугообразования в свече.

2. Впервые разработан алгоритм определения предельно допустимой скорости плазмообразующего воздуха через плазменную свечу в зависимости от параметров силовой цепи, при которых обеспечивается устойчивое дугообразование, являющийся основой для расчета требуемых параметров плазменных систем зажигания.

3. Разработаны схемотехническая и аналитическая имитационная компьютерные модели, позволяющие исследовать электроразрядные процессы в силовой цепи и в осцилляторе и определять параметры плазменных систем зажигания постоянного тока на стадиях разработки и проектирования.

4. Получены количественные соотношения для основных параметров ионизирующих импульсов осциллятора, позволяющие оценивать разрядные характеристики при различных сочетаниях параметров разрядной цепи в ходе

разработок и проектирования. Установлено, что длительность ионизирующих импульсов осциллятора при прочих равных условиях превышает длительность разрядных процессов в емкостных системах зажигания аналогичных схем построения.

5. С участием автора разработаны и внедрены в ФГУП УАПО электротехнические узлы универсального экспериментального стенда по исследованию устойчивости электроразрядных процессов в плазменных системах зажигания в условиях, имитирующих различные режимы запуска ГТД, включая режимы высотного запуска.

6. Результаты экспериментальных исследований закономерностей разрядных процессов в осцилляторе подтверждают адекватность разработанных компьютерных моделей. Расхождение не превышает 15%. Результаты теоретического определения времени гашения дуги в плазменной свече для выбора режима работы осциллятора подтверждены экспериментально с расхождением в 30 %, что объясняется сложностью выбора аппроксимирующего выражения для реальных вольт-амперных характеристик, на которые влияет множество трудноучитываемых факторов.

7. В результате исследования эффективности импульсно-плазменных систем зажигания подтверждена возможность использования известного для классических импульсных емкостных систем зажигания показателя воспламеняющей способности для оценки эффективности импульсно-плазменных систем зажигания.

8. Разработаны защищенные патентами схемы подключения осцилляторов, обеспечивающие повышение эффективности плазменных систем зажигания, разработана защищенная патентом структурная схема управляемой плазменной системы зажигания, разработан комбинированный измеритель динамических и статических пробивных напряжений плазменных свечей.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

В рецензируемом журнале из списка ВАК

1. К определению режима работы осциллятора в составе плазменной системы зажигания / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов // Вестник УГАТУ: Научный журнал Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9, № 6 (24). С. 170-177.

Патенты на полезные модели

2. Комбинированная система зажигания. / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, А.В. Лобанов // Патент на полезную модель 74667 Рос. Федерация. № 2008105265/22; заявл. 12.02.2008; опубл. 10.07.2008, Бюл. №19.

3. Плазменная система зажигания. / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, В.А. Чигвинцев, И.Х. Байбурин, А.В. Лобанов // Патент на полезную модель 86251 Рос. Федерация. №. 2009116196/22 заявл. 28.04.2009 опубл. 27.08.2009, Бюл. №24.

4. Плазменная система зажигания. / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, В.А. Чигвинцев, И.Х. Байбурин, А.В. Лобанов // Патент на полезную модель 94640 Рос. Федерация. № 2010102469/22 заявл. 25.01.2010 опубл. 27.05.2010, Бюл. №15.

5. Плазменная система зажигания. / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, А.В. Лобанов, З.Г. Габидуллина // Патент на полезную модель 99829 Рос. Федерация. № 2010127991/06 заявл. 06.07.2010 опубл. 27.11.2010, Бюл. №33.

В других изданиях

6. Оценка эффективности импульсно-плазменной системы зажигания / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научн. сб. – Уфа: УГАТУ, 2008. С. 187-191.

7. Оценка эффективности импульсно-плазменной системы зажигания / Р.М. Салихов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / Уфимск. гос. Авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2008. С. 35-36.

8. К анализу устойчивости электродуговых процессов в плазменных системах зажигания / Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М. // Электроника, автоматика и измерительные системы: Межвуз. науч. сб. – Уфа: УГАТУ, 2009. С. 112-116.

9. Анализ схем построения осцилляторов в составе плазменных систем зажигания / Р.М. Салихов, М.Ф. Сайгафаров // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: / Уфимск. гос. Авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2009. С. 37-38.

10. Плазменная система зажигания / Р.М.Салихов, И.Х. Байбурин, М.Ф. Сайгафаров // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник трудов 5-ой Всероссийской зимней школы – семинара аспирантов и молодых ученых т.2 17-20 февраля 2010г. С. 304-306.

11. Обоснование выбора и конструкция датчика для регистрации разрядных токов в цепях осцилляторов / Р.М. Салихов, М.Ф. Сайгафаров // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник трудов 5-ой Всероссийской зимней школы – семинара аспирантов и молодых ученых т.2 17-20 февраля 2010г. С. 104-106.

12. Перспективы развития систем зажигания авиационных двигателей / Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Байбурин И.Х., Лобанов А.В.// Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научн. сб. – Уфа: УГАТУ, 2010. С. 9-16.

13. Об измерении температуры плазменной дуги в свечах зажигания / И.Х. Байбурин, Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научн. сб. – Уфа: УГАТУ, 2010. С. 214-216.

САЛИХОВ Ренат Мунирович

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЗАЖИГАНИЯ ГТД

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 30.03.2011. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офисная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,25. Усл. кр.- отт. 1,0. Уч. - изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 109.

ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа - центр, ул. К.Маркса, 12.