

На правах рукописи

ЗИНОВЬЕВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ
ЗАЖИГАНИЯ ГТД В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

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

Уфа-2008

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

Научный руководитель:

д-р техн. наук, проф. Гизатуллин Фарит Абдулганеевич

Официальные оппоненты:

д-р техн. наук, проф. Воронин Сергей Григорьевич

канд. техн. наук, доц. Султангалеев Рафиль Наильевич

Ведущее предприятие:

ФГУП Уфимское научно-
производственное предприятие «Молния»

Защита состоится 19 декабря 2008 г. в 10 ч.00 мин. на заседании диссертационного совета Д -212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2008 г.

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

Г.Н. Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Электрические системы зажигания являются одной из наиболее ответственных частей комплекса электрооборудования летательных аппаратов и от их эффективности во многом зависит надежность работы авиационных двигателей и безопасность полетов. На сегодняшний день наиболее широкое распространение в отечественном и зарубежном авиационном двигателестроении в силу ряда преимуществ получили емкостные системы зажигания (ЕСЗ), комплектуемые полупроводниковыми запальными свечами. Рост требований к характеристикам запуска ГТД обуславливает необходимость постоянного совершенствования ЕСЗ и поиска новых подходов к повышению их энергетической эффективности.

Вопросы повышения эффективности авиационных систем зажигания рассматривались во многих работах отечественных и зарубежных авторов, среди которых следует 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. Г. Лефевра, Дж. Р. Фрусса, К. К. Светта и др.

Можно считать, что к настоящему времени возможности совершенствования традиционных ЕСЗ за счет оптимизации параметров разрядных контуров практически исчерпаны. Практика разработки и эксплуатации современных ЕСЗ свидетельствует о том, что характерным энергетическим параметром разрядных импульсов в свечах соответствует частота следования разрядов $f_{\text{имп}} = 0,5 \dots 20$ Гц. На данном этапе развития определенный интерес могут представлять задачи повышения эффективности ЕСЗ за счет реализации особых режимов разрядного процесса в свечах зажигания, связанных с повышением частоты следования разрядов до значений $f_{\text{имп}} = 10^2 \dots 10^4$ Гц.

Определенный интерес представляет возможность реализации высокочастотного режима в ЕСЗ, имеющих однополярную форму разрядного тока (ЕСЗ апериодического разряда) и сравнительный анализ характеристик высокочастотного режима в ЕСЗ с однополярным током и в традиционных ЕСЗ колебательного разряда.

Основная трудность реализации высокочастотного режима в условиях ЕСЗ связана с необходимостью обеспечения высокой устойчивости генерирования разрядов. Стабильность формирования мощных ($P_{\text{max}} > 10$ кВт) разрядных импульсов с частотой повторения свыше 1 кГц во многом зависит от качества процесса коммутации накопленной энергии и определяется характеристиками используемой коммутирующей аппаратуры. Если используется газоразрядный коммутатор (как в большинстве ЕСЗ), то качество коммутации определяется динамикой изменения электрической прочности коммутатора, которая, в свою очередь, является сложной функцией электрических параметров разряд-

ного контура, физических параметров межэлектродной среды и параметров режима работы питающего преобразователя. С другой стороны, при стабильном генерировании мощных разрядов в непрерывном режиме мощность, потребляемая агрегатом от источника питания, будет возрастать пропорционально частоте следования. В такой ситуации целесообразным представляется генерировать импульсы сериями (пакетами), т.е. с определенными паузами. Оценка оптимального сочетания электрических параметров ЕСЗ и параметров режима работы питающего преобразователя в этом случае является актуальной задачей.

Достаточно перспективным на сегодняшний день является направление, связанное с совершенствованием методов контроля работоспособности систем зажигания, которые в более полной мере учитывали бы факторы, ответственные за качество работы систем воспламенения. Разработка таких методов контроля, которые позволяли бы измерять с достаточной точностью параметры процесса воспламенения одновременно с параметрами разрядов, является актуальной задачей.

В соответствии с обозначенной проблематикой сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Цель работы: Повышение энергетической эффективности емкостных систем зажигания ГТД, обоснование возможности использования пакетного режима генерирования разрядных импульсов в свечах зажигания.

Задачи

1. Разработка физико-математической модели единичного разряда в свече, отражающей динамические вольт-амперные характеристики разряда с учетом влияния параметров межэлектродной среды.

2. Разработка математической модели разрядных процессов в емкостных системах зажигания колебательного и апериодического разряда при работе в высокочастотном пакетном режиме с учетом влияния частоты следования разрядных импульсов на качество коммутации и динамику выделения энергии в запальных свечах; обоснование эффективности реализации высокочастотного пакетного режима в емкостных системах зажигания.

3. Экспериментальное подтверждение разработанных математических моделей.

4. Теоретическое исследование выходных характеристик разрядных процессов в емкостных системах зажигания колебательного и апериодического разряда с помощью разработанных моделей.

5. Разработка новых технических решений на основе результатов проведенных исследований.

На защиту выносятся:

1. Обоснование эффективности высокочастотного пакетного режима генерирования разрядных импульсов в емкостных системах зажигания колебательного и апериодического разряда.
2. Результаты моделирования вольт-амперных характеристик импульсных разрядов на основе анализа пробойных явлений в межэлектродном промежутке с учетом параметров разрядной среды и внешней электрической цепи.
3. Результаты теоретического и экспериментального исследования эффективности высокочастотного режима генерирования разрядов в ЕСЗ различных типов.
4. Новые технические решения в области современных систем зажигания и устройств их контроля.

Научная новизна:

1. Предложен и обоснован новый подход к повышению эффективности ЕСЗ колебательного и апериодического разряда, отличающийся от других решений организацией в разрядных контурах высокочастотного пакетного режима генерирования более коротких и более мощных разрядных импульсов. Установлено, что в ЕСЗ апериодического разряда процесс генерирования мощных импульсов с высокой частотой следования является более стабильным за счет снижения нагрузки на коммутирующий элемент.
2. Предложена и экспериментально подтверждена математическая модель поверхностного разряда, отличающаяся от других решений рядом уточнений механизма искрообразования в полупроводниковой свече зажигания. В частности показано, что более низкий уровень пробивных напряжений полупроводниковых свечей при заданных длине искрового зазора и давлении окружающего газа может быть объяснен без привлечения теплового механизма пробоя на основе эффекта усиления поля за счет высокой диэлектрической проницаемости специальной свечной керамики.
3. Впервые предложена математическая модель высокочастотного пакетного режима, отличающаяся от известных решений тем, что учитывает совместное влияние особенностей разрядной среды и параметров внешней электрической цепи на характеристики разрядов в полупроводниковых свечах емкостных систем зажигания.

Практическая значимость:

1. Результаты исследований позволяют создать емкостные системы зажигания колебательного и апериодического разряда повышенной эффективности, обладающие лучшими энергетическими показателями при сравнимых массе, габаритах и уровне потребляемой мощности, а также рассчитывать основные характеристики разрядов в зависимости от параметров свечей и разрядного контура.

2. Выявленные дополнительные преимущества емкостных систем зажигания аperiodического разряда позволяют осуществлять более стабильное формирование мощных разрядов при высокой частоте их следования за счет более низкой нагрузки на коммутирующий элемент.

3. Новые технические решения, направленные на совершенствование емкостных систем зажигания и устройств их контроля позволяют расширить функциональные возможности систем зажигания, повысить их эффективность и сократить затраты на проектирование и доводку с учетом особенностей применяемой топливной аппаратуры; разработки защищены тремя патентами на изобретение (Патент РФ № 2236019) и две полезные модели (Патент РФ № 32204, Патент РФ № 36863).

Внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в учебный процесс в УГАТУ на кафедре Электрооборудования летательных аппаратов и наземного транспорта на специальности 140609 – «Электрооборудование летательных аппаратов».

Апробация работы: Основные результаты исследований представлялись на следующих научно-технических конференциях:

1. Интеллектуальные системы управления и обработки информации. Всероссийская молодежная научно-техническая конференция, Уфа, 2003.

2. XXIX Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция, Москва, 2003.

3. Современные техника и технологии. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2005.

Публикации по теме работы: Результаты диссертационной работы отражены в 13 публикациях: в 6 научных статьях, из которых 2 опубликованы в изданиях ВАК, материалах 4 научных конференций и 3 патентах на 1 изобретение и 2 полезные модели.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений. Основная часть содержит 146 страниц, 38 рисунков и 1 таблицу. Список литературы включает 174 наименования и занимает 16 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования динамических характеристик искровых разрядов в ЕСЗ при работе в высокочастотном пакетном режиме работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В **первой главе** рассмотрены основные тенденции развития и принципы построения современных систем зажигания. Показана необходимость создания систем диагностики систем зажигания и настройки топливной аппаратуры для решения комплексных задач, возникающих при отладке систем воспламенения

ГТД. Приведены структуры перспективных ЕСЗ, из которых наиболее высокие показатели эффективности характерны для высоковольтных ЕСЗ, систем с однополярным разрядным током и комбинированных ЕСЗ.

Проанализированы актуальные проблемы искрового зажигания, показаны основные возможности повышения энергетической эффективности и воспламеняющей способности ЕСЗ. Отмечен способ повышения воспламеняющей способности ЕСЗ, который может быть реализован при фиксированном энергозапасе, предполагающий сочетание различных типов разрядов при повышении частоты их следования. На основе результатов известных исследований, а также опыта эксплуатации некоторых типов систем зажигания сделан вывод о перспективности использования высокочастотного пакетного режима в ЕСЗ.

В целях формализации основных свойств полупроводниковой свечи зажигания проведен анализ известных представлений о физике пробоя твердых полупроводников и диэлектриков, а также разрядов по поверхности. Как наиболее близкая по физической сути к изучаемому явлению, рассмотрена известная концепция, согласно которой инициирование поверхностного разряда происходит в так называемой тройной точке металл-диэлектрик-вакуум. При этом снижение напряжения поверхностного пробоя относительно пробивного напряжения обычного газового промежутка при тех же значениях длины и давления газа происходит за счет локального усиления напряженности электрического поля на катоде пропорционально величине диэлектрической проницаемости ϵ керамического материала, по поверхности которого развивается разряд. Основанием для применения данной концепции к полупроводниковой свече зажигания является тот факт, что в состав специальной свечной керамики включают соединения на основе оксидов титана, характерным свойством которых являются высокие значения ϵ .

Во **второй главе** разработана модель единичного разрядного импульса и определены вольт-амперные характеристики разрядных элементов ЕСЗ (искровой разрядник и полупроводниковая свеча зажигания). В качестве основы модели рассмотрена схема замещения разрядной цепи ЕСЗ (рис. 1), представляющая собой одночастотный колебательный контур, состоящий из предварительно заряженной накопительной емкости C , эквивалентной индуктивности L , эквивалентного сопротивления R (сопротивления проводов) и непосредственно межэлектродного промежутка. Искровой промежуток замещен генератором тока, который является суммой тока электронов i_e и тока ионов i_i и зависит от приложенного напряжения $u(t)$ в соответствии с формулой

$$C \frac{d u_c}{dt} = i_e + i_i = \frac{1 + \gamma}{\gamma} \cdot \frac{\epsilon c_0}{p d^2} n_e u, \quad (1)$$

где $u_c(t)$ – напряжение на емкости,

$\gamma \approx 0,025$ – коэффициент вторичной электронно-ионной эмиссии с катода;
 e – заряд электрона;
 $c_0 = 3,3 \cdot 10^6$ – безразмерный коэффициент, зависящий от вида газа;
 p – давление газа [Па];
 d – длина межэлектродного промежутка [см];
 $n_e(t)$ – концентрация электронов.

Поскольку газ в межэлектродном промежутке рассматривается как основная среда, в которой развивается разряд, то функция $n_e(t)$ определяется из уравнения непрерывности в 0-мерном приближении, описывающего процесс нарастания электронной лавины за счет ударной ионизации газа:

$$\frac{d n_e}{d t} = \alpha v_e n_e - \frac{\beta}{\gamma} n_e^2, \quad (2)$$

где α – коэффициент ударной ионизации;
 $v_e = c_0 u(t)/pd$ – скорость дрейфа электронов;
 $\beta \approx 5,73 \cdot 10^{-5}$ см³/с – коэффициент рекомбинации, который принимается постоянным для заданного давления.

При расчете вольт-амперных характеристик разрядных элементов ЕСЗ важно учитывать условия перехода от лавинного пробоя к самостоятельной дуговой форме разряда. Из теории разрядов в газах известно, что для самоподдерживающегося режима дуговой стадии характерны низкие ($\sim 20 \dots 100$ В) значения катодного падения потенциала, возможные вследствие усиления поля на катоде по причине экранирования внешнего поля объемным зарядом ионов. При этом также известно, что характерные значения длины катодного слоя d_k составляют порядка дебаевского радиуса экранирования $r_D = 10^{-5} \dots 10^{-2}$ см, а формирование катодного слоя происходит при достижении электронной лавиной критической величины $n_{екр} = 10^8$ см⁻³. Поэтому в целях учета этого усиления в рамках исследуемой модели для величины d_c используется аппроксимация в виде ступенчатой функции

$$d_k = \begin{cases} d \cdot 10^{-2} \text{ см}, & n_e(t) > 10^8 \text{ см}^{-3}; \\ d, & n_e(t) \leq 10^8 \text{ см}^{-3}. \end{cases} \quad (3)$$

В то же время известно, что для разряда по поверхности керамического материала с диэлектрической проницаемостью ε характерно усиление поля на катоде, не зависящее от тока в промежутке и равное

$$E_k = \varepsilon E_0 = \varepsilon u(t)/d. \quad (4)$$

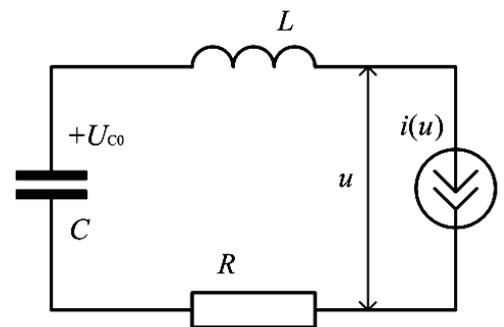


Рисунок 1 – Схема замещения разрядного контура ЕСЗ

В соответствии с вышеизложенным, в рассматриваемой модели для определения коэффициента ударной ионизации α используется аппроксимация Таунсенда, которая с учетом (3) и (4) приобретает вид

$$\alpha = A_0 p \exp\left(-\frac{B_0 p d_k}{\varepsilon u(t)}\right), \quad (5)$$

где величины A_0 и B_0 табулированы для большинства газов и для воздуха при атмосферном давлении $A_0 = 0,093$ пар ионов/см·Па; $B_0 = 2,74$ В/см·Па.

Таким образом, рассматривая состояние схемы замещения разрядного контура (рис.1) с помощью уравнений (1) и (2) с учетом (5) и совместно с уравнением Кирхгофа $L(di/dt) + Ri + u_c + u = 0$, получим общую для разрядника и свечи зажигания систему уравнений

$$\begin{aligned} L \frac{ec_0}{pd^2} \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{d}{dt} (n_e u) + R \frac{ec_0}{pd^2} \frac{1+\gamma}{\gamma} n_e u + u + u_c &= 0; \\ C \frac{du_c}{dt} &= \frac{ec_0}{pd^2} \frac{1+\gamma}{\gamma} n_e u; \\ \frac{dn_e}{dt} &= \frac{A_0 c_0}{d^2} u n_e \exp\left(-\frac{B_0 p d_k}{\varepsilon u}\right) - \frac{\beta}{\gamma} n_e^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Для системы (6) задаются начальные условия $n_e(0) = N_0$; $u_c(0) = U_{C0}$; $u_p(0) = 0$. В случае если рассматривается разрядник, то величине диэлектрической проницаемости в третьем уравнении присваивается значение $\varepsilon = 1$, а в случае свечи зажигания поверхностного разряда – $\varepsilon = 3 \dots 7$.

Численное решение системы (6) осуществлялось в пакете Mathematica-5 с помощью неявных разностных алгоритмов. Результаты моделирования и известных экспериментальных исследований в виде ВАХ импульсных разрядов и характерных зависимостей показаны на рис.2, а – е.

Видно, что полученные с помощью численного моделирования характеристики единичного разряда по поверхности (рис.2, а) отражают типичные для данного типа разряда подготовительную и искровую стадии, которые наблюдаются также и на опытных осциллограммах (рис. 2, б).

На основе разработанной модели рассчитаны значения энергии единичного разряда в свече для различных значений длины рабочего зазора и давления окружающего воздуха (рис. 2, в), а также значения пробивного напряжения U_{C0min} свечи и длительности подготовительной стадии разряда t_{nc} для различных значений накопительной емкости (рис. 2, г) и затем сравнены с опытными данными из ранее известных работ. Расхождения между расчетными и опытными данными не превысили 15%.

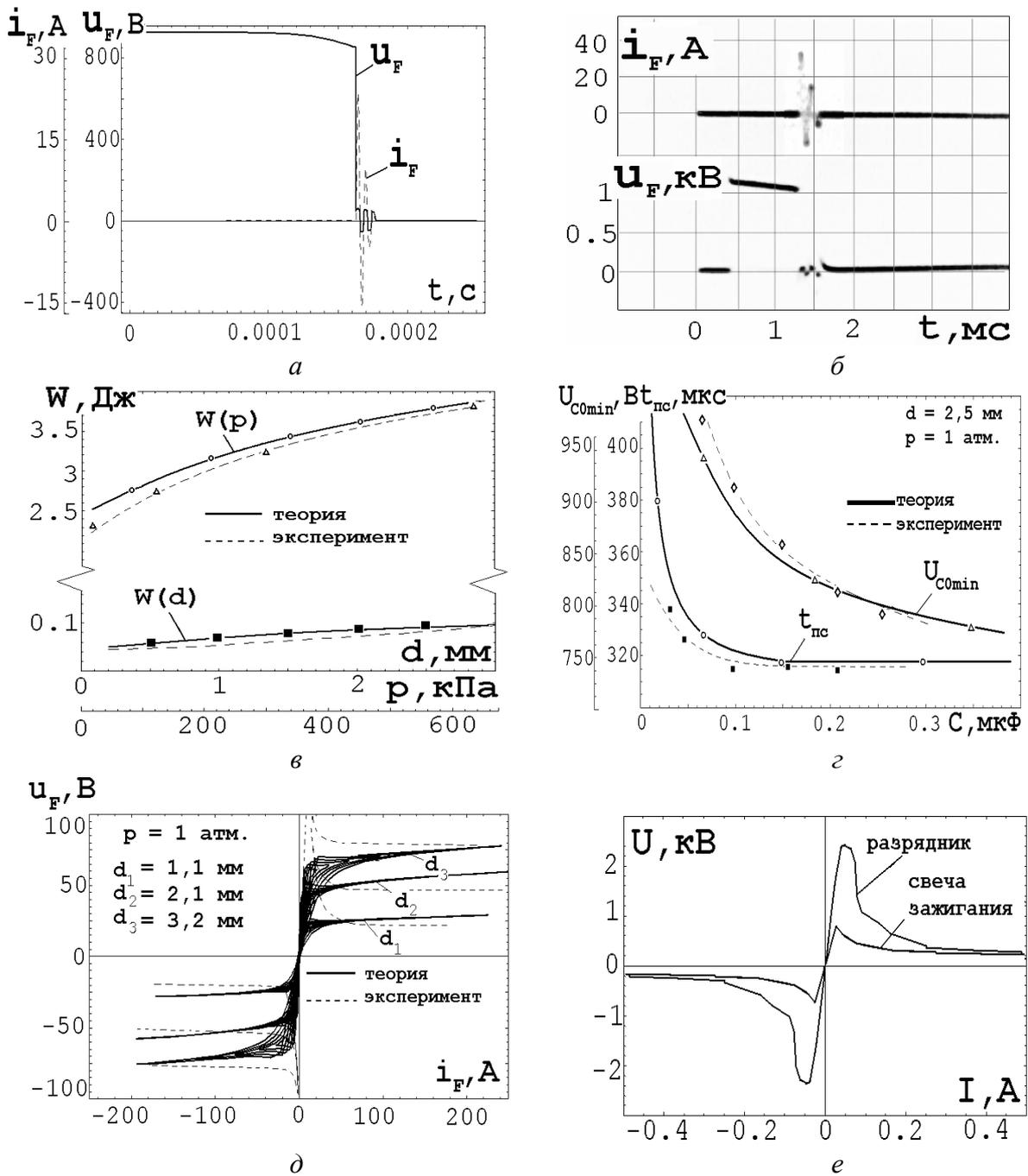


Рисунок 2 – Результаты исследования единичного разряда в ЕСЗ: расчетные динамические кривые тока и напряжения (а); экспериментальные осциллограммы (б); зависимость энергии разряда от параметров рабочего зазора свечи (в); зависимости пробивного напряжения и длительности подготовительной стадии от емкости накопительного конденсатора (г); динамические ВАХ искровой стадии (д); аппроксимированные ВАХ разрядника и свечи (е)

Исследованные с помощью моделирования и экспериментально проверенные динамические ВАХ импульсных разрядов (рис. 2, д) с учетом характерных значений напряжения пробоя были обозначены как квазистатические и аппроксимированы в виде соответствующих зависимостей (рис. 2, е).

В третьей главе на основе полученных ВАХ разрядных элементов разработана модель высокочастотного пакетного режима генерирования разряд-

ных импульсов в ЕСЗ. Исходя из ряда положений теории электрической дуги, была использована модель, учитывающая экспоненциальный характер температурной зависимости электропроводности газоразрядной плазмы (формулы Саха). С помощью этой зависимости и приближения, известного как канальная модель электрической дуги, получено уравнение, описывающее изменение интегральной динамической проводимости столба разряда, которое имеет вид

$$\theta \cdot \ln^{-2} \left(\frac{g}{g_0} \right) \frac{dg}{dt} + g = \frac{i(t)}{f[i(t)]}, \quad (7)$$

где $g(t)$ – динамическая проводимость разрядного канала;

$i(t)$ – разрядный ток;

$f[i(t)]$ – рассчитанная ВАХ разрядного элемента;

$\theta = c_p \rho r_0^2 / \lambda \approx 10^{-5}$ с – тепловая постоянная времени или характерное время нарастания тепловой неустойчивости в газоразрядной плазме, для которой известны значения удельной теплоемкости c_p , плотности ρ и коэффициента теплопроводности λ . При этом характерный радиус искрового канала на основе известного приближения принимается постоянным: $r_0 \approx 0,13$ мм.

Уравнение (7) позволяет теоретически описывать изменение электрической прочности искрового промежутка с заданными параметрами межэлектродной среды в зависимости от параметров внешней цепи и параметров приложенного импульса напряжения, что особенно важно для оценки качества коммутации в условиях ЕСЗ.

Таким образом, наличие уравнения (7) позволило рассмотреть разветвленную схему замещения ЕСЗ колебательного разряда (рис. 3, а), состоящую из цепи заряда накопительной емкости и непосредственно разрядного контура, содержащего два нелинейных элемента ($f(i_3)$ – разрядник, $\varphi(i_3)$ – свеча зажигания), обладающие ВАХ, которые рассчитаны на основе типичных для них значений параметров межэлектродной среды. При этом генерирование серий разрядных импульсов в рамках данной модели обеспечивается соответствующим режимом работы питающего преобразователя, выдающего на холостом ходу импульсы напряжения характерной формы (рис. 3, б), амплитуда и

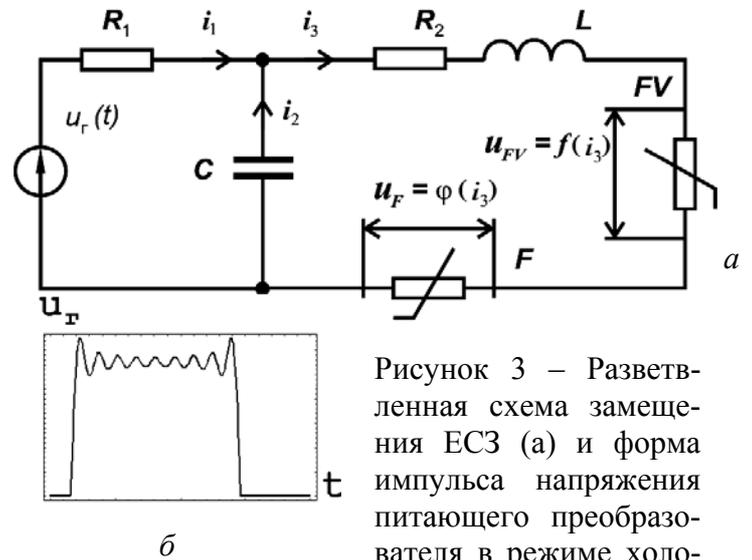


Рисунок 3 – Разветвленная схема замещения ЕСЗ (а) и форма импульса напряжения питающего преобразователя в режиме холостого хода (б)

длительность которых варьируются в процессе моделирования в целях определения оптимального режима.

На основе законов Кирхгофа и условия (7) тепловой инерционности разрядных элементов (θ , $g(t)$ – разрядник, τ , $y(t)$ – свеча зажигания) получена система уравнений, описывающая состояние схемы замещения ЕСЗ, которая имеет вид

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 &= i_3; & L \frac{d i_3}{d t} + \left(R_2 + \frac{1}{g} + \frac{1}{y} \right) i_3 + u_C &= 0; \\ i_2 &= C \frac{d u_C}{d t}; & \theta \cdot \ln^{-2} \left(\frac{g}{g_0} \right) \frac{d g}{d t} + g &= \frac{i_3}{f(i_3)}; \\ R_1 i_1 - u_C &= u_F; & \tau \cdot \ln^{-2} \left(\frac{y}{y_0} \right) \frac{d y}{d t} + y &= \frac{i_3}{\varphi(i_3)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Численное решение системы (8) в соответствии с начальными условиями ($i_1(0) = i_2(0) = i_3(0) = 0$; $u_C(0) = 0$; $g(0) = g_0$; $y(0) = y_0$) и варьирование параметров разрядного контура и параметров воздействующего импульса напряжения позволило получить динамические характеристики серий разрядов, отличающиеся по степени устойчивости (рис. 4, а – б). Результаты экспериментальных исследований пакетного режима (рис. 4, в – г), полученные с помощью разработанной лабораторной установки, показали соответствие расчетным характеристикам.

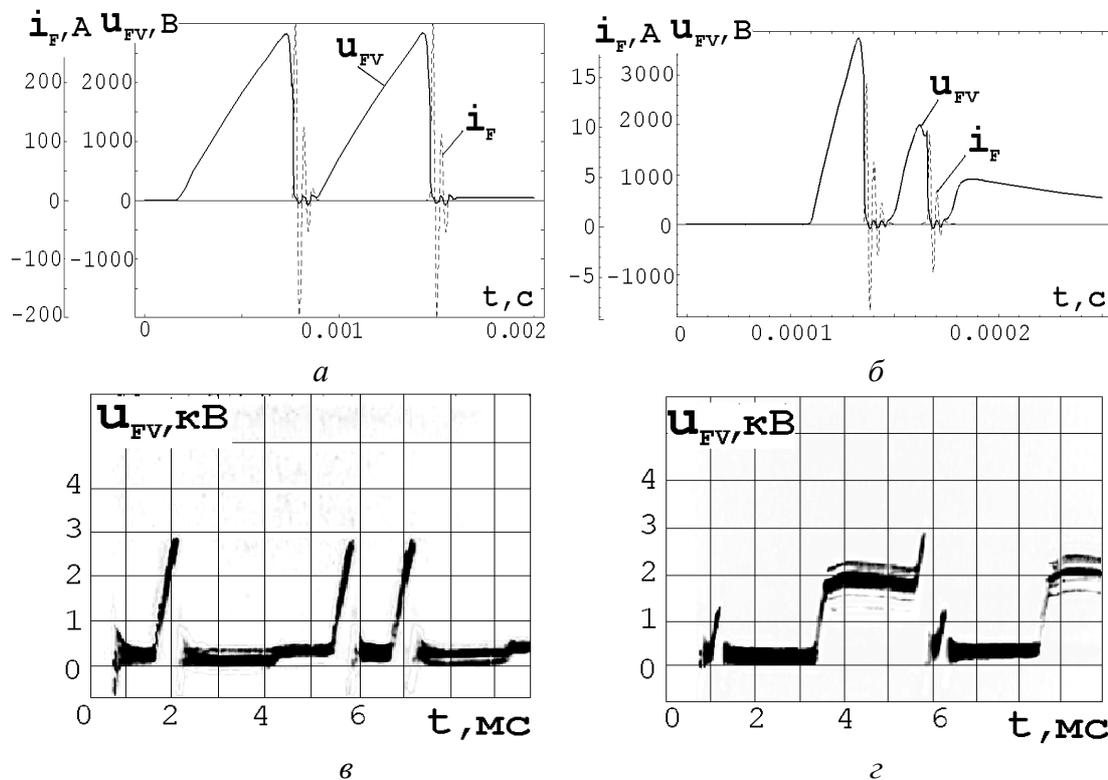


Рисунок 4 – Расчетные (а, б) и экспериментальные (в, г) характеристики пакетного режима

Рассмотрена схема замещения ЕСЗ апериодического разряда (рис. 5, а), содержащая третий нелинейный элемент, обладающий характеристикой высо-

ковольтного диода (рис. 5, б). Для имитации входного воздействия в виде импульса напряжения питающего генератора также использовалась функция, качественный вид которой показан на рис. 3, б.

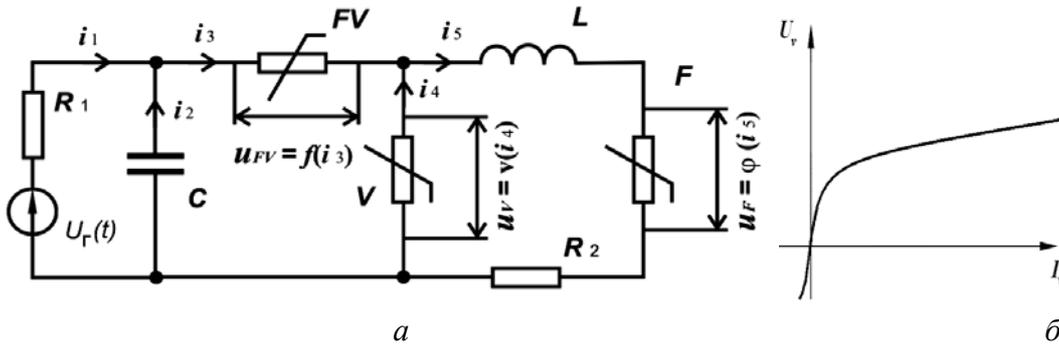


Рисунок 5 – Разветвленная схема замещения ЕСЗ аperiodического разряда (а) и используемая для расчетов ВАХ высоковольтного диода (б)

С учетом характеристики диода $v(i_4)$ и допущения о его безынерционности, получена система уравнений, описывающая состояние схемы замещения ЕСЗ аperiodического разряда при работе в пакетном режиме:

$$\begin{aligned}
 i_1 + i_2 &= i_3; & i_3 + i_4 &= i_5; \\
 i_2 &= C \frac{du_C}{dt}; & R_1 i_1 - u_C &= u_F; \\
 u_C + \frac{i_3}{g} - v(i_4) &= 0; & v(i_4) + L \frac{di_5}{dt} + \frac{i_5}{y} + R_2 i_5 &= 0; \\
 \theta \cdot \ln^{-2} \left(\frac{g}{g_0} \right) \frac{dg}{dt} + g &= \frac{i_3}{f(i_3)}; & \tau \cdot \ln^{-2} \left(\frac{y}{y_0} \right) \frac{dy}{dt} + y &= \frac{i_5}{\varphi(i_5)}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В результате исследования модели (9) при нулевых условиях ($i_1(0) = i_2(0) = i_3(0) = i_4(0) = i_5(0) = 0$; $u_C(0) = 0$; $g(0) = g_0$; $y(0) = y_0$) с помощью численных методов, а также в результате эксперимента получены динамические характеристики единичного аperiodического разряда (рис. 6, а, б) и характеристики серий однополярных разрядных импульсов с различной степенью устойчивости (рис. 6, в, г).

В результате теоретического и экспериментального исследования динамических характеристик ЕСЗ аperiodического разряда было установлено, что особенностью систем данного типа по сравнению с ЕСЗ колебательного разряда является более стабильное генерирование мощных разрядов с высокой частотой следования за счет более низкой нагрузки на коммутирующий элемент.

Удовлетворительное соответствие расчетных результатов экспериментальным данным дало возможность провести теоретическое исследование энергетической эффективности ЕСЗ колебательного и аperiodического разряда при работе в высокочастотном пакетном режиме в более широком диапазоне параметров.

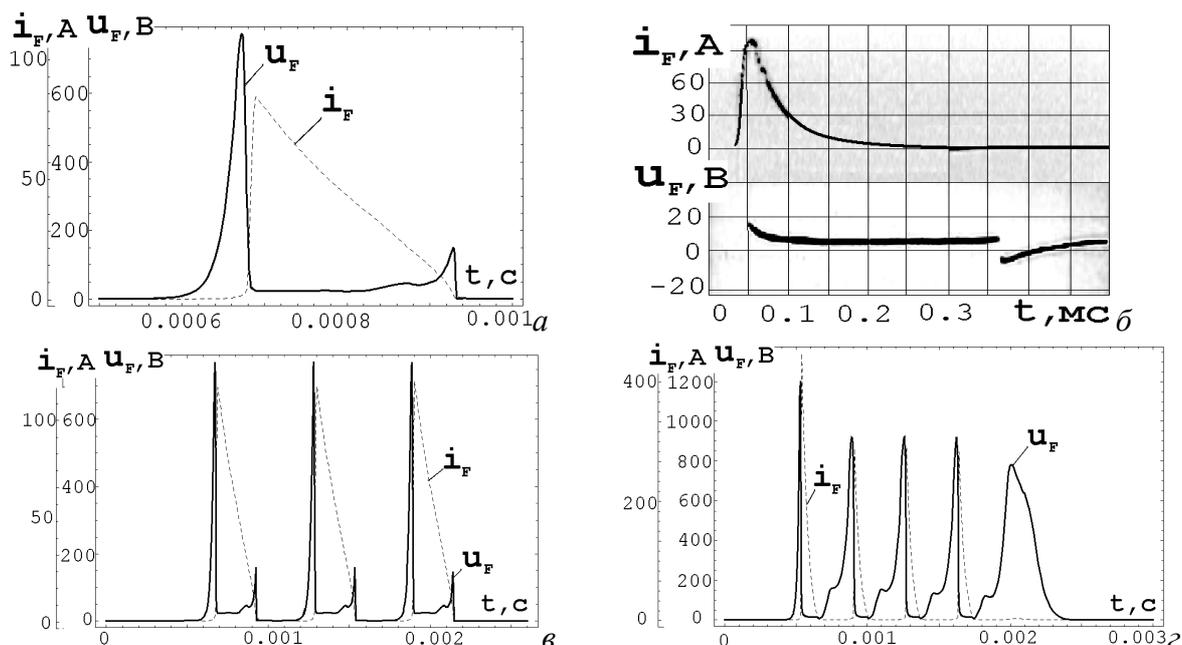


Рисунок 6 – Динамические характеристики ЕСЗ аperiodического разряда: расчетные (а) и экспериментальные (б) осциллограммы единичного импульса; расчетные характеристики пакетного режима (в, г)

На основе решения (8) и (9) рассчитывались значение энерговклада W_{Π} в течение пакета разрядов в соответствии с выражением

$$W_{\Pi} = \int_0^{T_{\Pi}} \frac{i_F^2(t)}{y(t)} dt. \quad (10)$$

При этом также оценивалось среднее значение мощности, потребляемой агрегатом от источника питания:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T_{\text{с.п.}}} \int_0^{T_{\Pi}} i_1(t) u_{\Gamma}(t) dt. \quad (11)$$

Результаты расчетов показаны на рис. 7, а и б в виде зависимостей энергии пакета разрядов (кривые 1-3) и средней мощности, потребляемой от источника (кривые 4-6), от величины емкости накопительного конденсатора для ЕСЗ колебательного и аperiodического разряда соответственно. Число K соответствует количеству импульсов в пакете. Пунктиром обозначены участки кривых, соответствующие срыву генерации разрядов, чем, возможно, объясняется максимум зависимости $W_{\Pi}(C)$. Рассчитанные таким образом параметры пакетного режима, соответствующие различным значениям средней мощности источника $P_{\text{ср}}$, приведены в Таблице 1.

В соответствии с результатами проведенных исследований даны практические рекомендации по использованию современной коммутирующей аппаратуры и по оптимальному выбору параметров пакетного режима в условиях ЕСЗ,

направленному на повышение их энергетической эффективности и снижение потребляемой мощности.

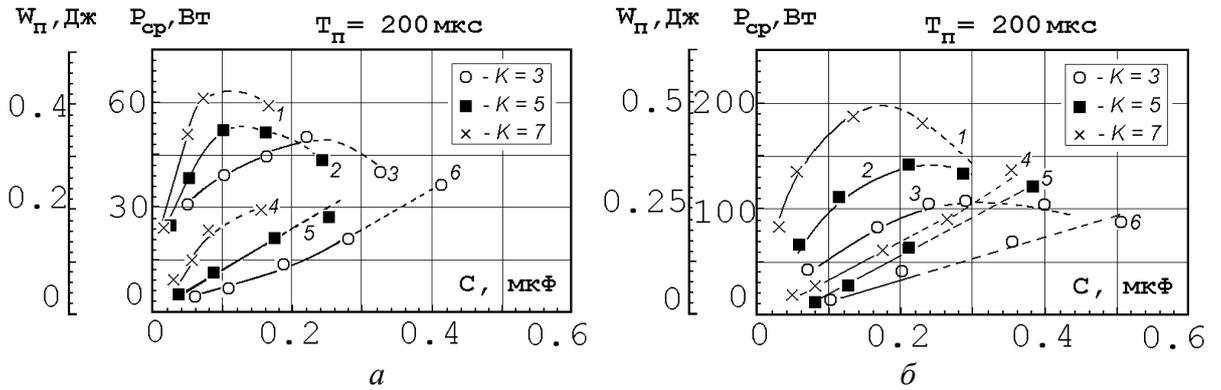


Рисунок 7 – Зависимости $W_n(C)$ для ЕСЗ колебательного (а) и аperiodического разряда (б)

Таблица 1

P_{cp} , Вт	Колебательный разряд									Аperiodический разряд								
	$T_n = 200$ мкс			$T_n = 500$ мкс			$T_n = 1$ мс			$T_n = 200$ мкс			$T_n = 500$ мкс			$T_n = 1$ мс		
	W_n , Дж	$f_{имп}$, кГц	U_r , кВ	W_n , Дж	$f_{имп}$, кГц	U_r , кВ	W_n , Дж	$f_{имп}$, кГц	U_r , кВ	W_n , Дж	$f_{имп}$, кГц	U_r , кВ	W_n , Дж	$f_{имп}$, кГц	U_r , кВ	W_n , Дж	$f_{имп}$, кГц	U_r , кВ
20	0,2	0,8	7	0,4	0,8	7	0,9	0,7	7	0,3	0,6	7	0,6	0,7	7	1,2	0,7	7
50	0,3	1,2	10	0,6	1,2	10	1	1,2	10	0,32	1,1	10	0,9	1,2	10	1,5	1,2	10
100	0,7	1,5	15	1,0	1,5	15	1,3	1,4	15	0,8	1,4	15	1,2	1,4	15	1,8	1,4	15
500	1,1	2	22	1,3	2	22	1,7	2,3	22	1,2	1,9	22	1,7	2,3	22	2,1	2,3	22

В четвертой главе предложены новые технические решения, направленные на совершенствование емкостных систем зажигания и устройств их контроля, которые позволяют расширить функциональные возможности систем зажигания, повысить и эффективность и сократить затраты на проектирование и доводку с учетом особенностей применяемой топливной аппаратуры. В частности, рассмотрен метод решения комплексных задач, возникающих при отладке систем воспламенения ГТД и связанных с нерозжигом смеси либо с недопустимой задержкой воспламенения. Суть данного метода заключается в определении момента попадания топлива в искровой промежуток путем измерения падения напряжения в свече, которое, как известно, увеличивается при смачивании рабочего торца свечи топливом. На основе указанного принципа разработано устройство контроля работоспособности систем зажигания и настройки топливной аппаратуры, структурная схема которого показана на рис. 8, где обозначено: 1 – дели-

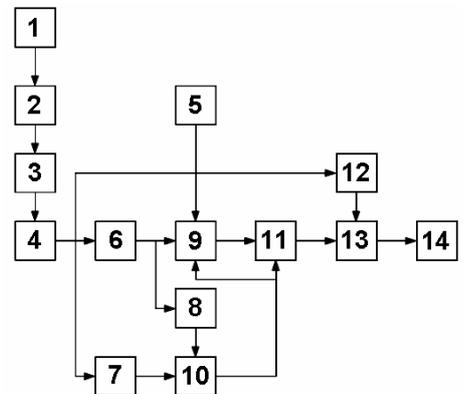


Рисунок 8 – Структурная схема устройства контроля ЕСЗ (Патент РФ № 2236019)

тель напряжения; 2 – ограничитель амплитуды сигнала; 3 – выпрямитель; 4 – цепь задержки; 5 – датчик подачи топлива; 6 и 7 – компараторы; 8 – одновибратор; 9 – счетчик; 10 – элемент “И”; 11 – регистр; 12 – измеритель периода следования импульсов; 13 – блок арифметического умножения; 14 – блок индикации.

Выявленные в результате исследований дополнительные преимущества ЕСЗ с однополярным током разряда позволили сделать ряд технических предложений, направленных на совершенствование выходных показателей таких систем. Одно из таких технических решений предполагает повышение вольтажа ЕСЗ апериодического разряда за счет использования активизатора в схеме агрегата зажигания (Патент РФ № 32204). Данное решение позволяет повысить энергетическую эффективность ЕСЗ, а также улучшить показатели высотного запуска при сохранении всех известных преимуществ систем зажигания с однополярным током разряда.

Результаты исследования характеристик высокочастотного пакетного режима продемонстрировали ряд принципиальных достоинств однополярного разряда по сравнению с колебательным, что дало определенные основания для реализации такого режима в условиях ЕСЗ с одним преобразователем на две свечи. Разработанная схема (Патент РФ № 36863) сочетает преимущества схем с однополярным током разряда, схем с резервированием, а также может обеспечить повышенную воспламеняющую способность за счет генерирования мощных однополярных импульсов с высокой частотой следования.

Заключение

1. Предложен и обоснован новый подход к повышению эффективности емкостных систем зажигания колебательного и апериодического разряда, заключающийся в организации в разрядных контурах высокочастотного пакетного режима следования разрядных импульсов.

2. Разработана и подтверждена экспериментально математическая модель единичного поверхностного разряда в полупроводниковой свече зажигания на основе анализа совместного влияния электрических параметров внешней цепи и параметров межэлектродной среды. Показано, что более низкий уровень пробивных напряжений для полупроводниковой свечи при заданных длине искрового зазора и давлении окружающего газа может быть объяснен без привлечения теплового механизма пробоя и в рамках предложенной модели определяется эффектом усиления поля за счет высокой диэлектрической проницаемости специальной свечной керамики. Полученные в результате моделирования динамические характеристики разрядов отражают все характерные для поверхностного разряда закономерности, расхождения теории и эксперимента не превысили 15%.

3. Разработана и подтверждена экспериментально математическая модель высокочастотного пакетного режима в емкостной системе зажигания колебательного и апериодического разряда, учитывающая влияние частоты повторения разрядных импульсов на качество коммутации и пиковую мощность формируемых разрядов, что позволяет рассчитать оптимальные сочетания параметров систем зажигания, обеспечивающие необходимый уровень энерговыклада и средней потребляемой мощности при работе в пакетном режиме. Расчетные характеристики расходятся с результатами эксперимента не более чем на 15%.

4. На основе проведенных исследований энергетической эффективности емкостных систем зажигания даны рекомендации по улучшению качества коммутации и повышению стабильности генерирования разрядных импульсов при работе в пакетном режиме. Доказана возможность повышения энергетической эффективности емкостных систем зажигания различных типов за счет генерирования определенного количества более коротких но более мощных импульсов. Установлено что в емкостных системах зажигания апериодического разряда процесс генерирования мощных разрядных импульсов при высокой частоте их следования является более стабильным за счет сниженной нагрузки на коммутирующий элемент. Выявлены оптимальные с точки зрения максимального выделения энергии в свечах параметры разрядного контура и выходные параметры питающего преобразователя.

5. Результаты проведенных исследований позволили разработать новые технические решения, защищенные тремя патентами на изобретение и полезные модели, направленные на совершенствование емкостных систем зажигания и устройств их контроля, которые позволяют расширить функциональные возможности систем зажигания, повысить их эффективность и сократить в 1,5-2 раза затраты на проектирование и доводку с учетом особенностей применяемой топливной аппаратуры.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

В изданиях из перечня ВАК:

1. К вопросу оптимизации параметров емкостной системы зажигания ГТД в режиме генерирования серий разрядных импульсов с высокой частотой следования / Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев. // Вестник УГАТУ, 2007. Т.9, № 6(24). С. 178-186.

2. Моделирование разрядных импульсов емкостной системы зажигания ГТД / Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев. // Известия вузов. Авиационная техника, 2008. №2. С. 45-51.

В других изданиях:

3. О совершенствовании контроля качества настройки аппаратуры запуска газотурбинных двигателей / Ф.А. Гизатуллин, В.Х. Абдрахманов, К.В.

Зиновьев // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. – Уфа: Изд. УГАТУ, 2003. С. 8-11.

4. Сравнительный анализ современных отечественных и зарубежных емкостных систем зажигания / Ф.А. Гизатуллин, А.В. Краснов, К.В. Зиновьев // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. – Уфа: Изд. УГАТУ, 2003. С. 83-92.

5. К вопросу расчета параметров системы зажигания апериодического разряда / К.В. Зиновьев // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Материалы междунар. научно-техн. конф. – Уфа, 2003. - С. 217.

6. Устройство диагностики согласованности работы элементов систем воспламенения ГТД / В.Х. Абдрахманов, К.В. Зиновьев // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Материалы междунар. научно-техн. конф. – Уфа, 2003. - С. 218.

7. Тенденции развития емкостных систем зажигания газотурбинных двигателей / К.В. Зиновьев, И.А. Ворончихин // XXIX Гагаринские чтения: Материалы Междунар. молодежн. научн. конф. М.: «МАТИ» РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2003. т. 4. С. 51-52.

8. Емкостная система зажигания апериодического разряда. Патент № 32204, РФ МКИ F05 P 3/06 / Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев. Оpubл. 10.09.2003. Бюл. № 25.

9. Емкостная система зажигания с одним преобразователем на две свечи. Патент № 36863, РФ МКИ F02 P 3/06. / Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев. Оpubл. 27.03.2004. Бюл. № 9.

10. Устройство контроля работоспособности системы зажигания и настройки топливной аппаратуры газотурбинного двигателя. Патент № 2236019, РФ МКИ G 01 R 29/02, F 02 P 17/12. / Ф.А. Гизатуллин, В.Х. Абдрахманов, К.В. Зиновьев. Оpubл. 10.09.2004. Бюл. № 25.

11. Моделирование разрядных процессов в емкостных системах зажигания с полупроводниковыми свечами / К.В. Зиновьев // Современная техника и технологии: Материалы XI Междунар. научно-практич. конф. – Томск, 2005. т.1. С. 302-304.

12. Схемы построения емкостных систем зажигания апериодического разряда / Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. – Уфа: Изд. УГАТУ, 2005. С. 135-139.

13. Применение метода медленно меняющихся амплитуд для анализа процессов в емкостных системах зажигания / К.В. Зиновьев // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. – Уфа: Изд. УГАТУ, 2005. С. 264-272.

Зиновьев Константин Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ
ЗАЖИГАНИЯ ГТД В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 12.11.2008 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 0,9. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 523

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