

УДК 621.45.044

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН, К. В. ЗИНОВЬЕВ

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ ГТД В РЕЖИМЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ СЕРИЙ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ

Рассматривается возможность реализации в емкостной системе зажигания (ЕСЗ) пакетного режима генерирования разрядных импульсов. Методами численного моделирования решается задача исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) разрядных элементов (искровой разрядник, свеча зажигания), а также моделируется непосредственно пакетный режим с учетом влияния частоты следования разрядов на динамику восстановления электрической прочности разрядных элементов. Теоретически оценивается возможность оптимизации параметров емкостной системы зажигания с целью обеспечения максимально возможной величины энергии пакета разрядных импульсов и максимально возможного значения их пиковой мощности при заданных значениях мощности источника питания, частоты следования разрядов и общем уровне напряжения агрегата зажигания. Емкостная система зажигания; вольт-амперная характеристика; искровой разряд; пакетный режим; энергетическая эффективность

Повышение частоты следования разрядов в свече зажигания при определенных условиях запуска двигателя в ряде работ рассматривается как один из возможных способов повышения эффективности процесса воспламенения. В частности, в [1] указывается на общую предпочтительность высокой частоты следования разрядов в тяжелых для воспламенения условиях, когда состав топливовоздушной смеси вблизи свечи зажигания далек от оптимального. Положительный эффект в этом случае связывается с достижением частоты следования разрядов такой величины, которая была бы достаточна для того, чтобы очередной разряд происходил в объеме газа, нагретого предыдущими разрядами, что определенным образом должно влиять на качество воспламеняемой смеси. Влияние частоты следования разрядов на характеристики камер сгорания в условиях высотного запуска исследовалось в работе [2], где показано, что к небольшому увеличению воспламеняющей способности свечи приводит повышение частоты от 2 до 150 Гц. С другой стороны, данные работ [3–5] свидетельствуют о том, что улучшение воспламеняемости за счет повышения частоты следования разрядов возможно только при определенных способах стабилизации пламени в камерах сгорания и пусковых воспламенителях. При этом

в отдельных случаях частота следования разрядных импульсов не играет существенной роли, а воспламеняемость улучшается за счет повышения энергии разрядов вследствие увеличения их длительности. Тем не менее, направление исследований, связанное с оценкой возможностей повышения частоты разрядов и влияние такого режима на эффективность воспламенения, рассматривается на сегодняшний день как перспективное.

Основная проблема, связанная с реализацией в ЕСЗ режима высокой частоты следования разрядов, заключается в том, что в системе с заданными массой и габаритами такой режим достигается за счет уменьшения энергии каждого разряда. Существенное сокращение периода следования разрядных импульсов возможно только при соответствующем сокращении длительности самих импульсов. Если при этом пиковая мощность импульса не изменяется, то менее длительный импульс будет обладать более низкой энергией. Следовательно, чтобы сохранить энергию на требуемом уровне, повышение частоты следования импульсов должно сопровождаться соответствующим повышением их пиковой мощности. Здесь однако возникает ряд дополнительных проблем, весьма актуальных не только для области систем зажигания, но и для импульсной техники в целом, суть которых

заключается в особенностях формирования мощных импульсов в режиме периодического следования.

Генерирование мощных импульсов в микро-, нано- и пикосекундном диапазоне основывается, как правило, на едином принципе последовательной компрессии (время-амплитудного сжатия) энергии, когда от высоковольтного источника через зарядное устройство энергия поступает в накопитель и посредством последующей коммутации выделяется затем в нагрузку. В структуре емкостных систем зажигания в целом реализуется этот же принцип. Высокий уровень пиковой мощности (10^4 – 10^5 Вт) формируемых разрядных импульсов при частоте повторения от 1 до 20 Гц здесь достигается за счет сокращения времени выделения энергии. Однако при переходе в более короткий временной диапазон пиковая мощность формируемых импульсов ограничивается возможностями используемых коммутирующих элементов. С другой стороны, если даже добиться большой пиковой мощности при высокой частоте следования, то при этом в условиях непрерывного генерирования импульсов в течение длительного времени резко возрастает потребляемая системой средняя мощность, что соответствующим образом отражается на массе и габаритах системы. Одним из возможных способов решения данной проблемы является реализация пакетного режима, при котором уровень потребляемой мощности определяется количеством и мощностью импульсов в пакете, а также длительностью временного интервала между пакетами.

Таким образом, разрешение конфликта между требованием повышения мощности и энергии разрядов, следующих с высокой частотой, и требованием минимизации потребляемой при этом мощности и составляет задачу оптимизации параметров ЕСЗ при работе в режиме генерирования серий (пакетов) разрядных импульсов. В настоящей статье предпринимается попытка теоретически оценить возможность реализации и основные характеристики такого режима. При этом основное внимание уделяется особенностям процесса коммутации и характеру его влияния на параметры (энергию и мощность) формируемых разрядов.

Эффективным средством теоретического анализа пакетного режима может стать математическая модель, которая должна наиболее адекватным образом отражать, во-первых, сам процесс генерирования последовательности разрядов, а во-вторых, учитывать

влияние частоты повторения на их пиковую мощность. При построении подобной модели необходимо отталкиваться непосредственно от самого понятия коммутации как процесса перехода коммутатора из непроводящего состояния с высокой проводимостью за время, много меньшее длительности формируемого импульса. Любое коммутирующее устройство в общем случае представляет собой два металлических электрода, разделенных средой, имеющей резкую зависимость тока от приложенного напряжения. В этом плане формирование последовательности импульсов следует описывать, рассматривая коммутирующий элемент как активное нелинейное сопротивление, обладающее соответствующей зависимостью, т. е. вольт-амперной характеристикой. Поскольку в составе ЕСЗ используются, как правило, газоразрядные коммутаторы в виде искровых (ионных) разрядников, а основная часть разрядного процесса в свече зажигания протекает в газовой среде, то эквивалентные ВАХ разрядника и свечи зажигания могут быть определены исходя из общих принципов теории электрических разрядов в газе.

Следует также отметить, что при работе любого генератора импульсов с газоразрядными коммутаторами в режиме периодического следования импульсов основным фактором, ограничивающим мощность последних, является время восстановления электрической прочности разрядника, которое физически определяется временем деионизации искрового промежутка. Из теории газового разряда известно [6, 7], что деионизация происходит тем быстрее, чем меньше энергии выделяется в разрядном канале и, одновременно, чем ниже частота колебаний разрядного тока, т. е. собственная частота разрядного контура. Проблема быстрого восстановления электрической прочности разрядников может быть в принципе решена путем осуществления циркуляции газа в рабочем объеме, реализации режима объемного лавинного разряда с меньшей плотностью плазмы, либо применения гибридной конструкции коммутаторов [8]. В то же время управляемую стабилизацию электрической прочности в отношении свечи зажигания, работающей практически внутри камеры сгорания ГТД, технически осуществить весьма сложно. Таким образом, учет динамики восстановления электрической прочности коммутирующего разрядника и свечи зажигания в итоге будет определять энергию и мощность формируемых разрядов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕДИНИЧНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

ВАХ импульсного разряда в газе может быть определена путем анализа динамики ионизационных процессов в газовом промежутке с заданными параметрами на стадии пробоя и в течение последующей искровой стадии. При этом скорость нарастания тока в искре без учета влияния внешней цепи будет зависеть от способа образования инициирующих электронов. Если электроны образуются на катоде, то согласно положениям известной модели [9] электронный ток может быть найден как

$$i_e = \frac{ev_e n_e}{l}, \quad (1)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; v_e — скорость дрейфа электронов; n_e — их концентрация; l — длина межэлектродного промежутка.

Предполагается, что пробой развивается по таунсендовскому механизму и для случая интенсивной однородной ионизации газа основная часть разрядного промежутка занята областью столба разряда, в котором градиент концентрации электронов в направлении оси разряда $dn_e/dx = 0$, а средняя напряженность электрического поля на промежутке $E_0 \approx U_0/l$, где U_0 — разность потенциалов между электродами. Тогда уравнение непрерывности для концентрации электронов в 0-м приближении будет иметь вид

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha v_e n_e - \beta n_e^2, \quad (2)$$

где α — коэффициент ударной ионизации (первый коэффициент Таунсенда); β — коэффициент рекомбинации.

Известно, что коэффициент рекомбинации $\beta \sim 1/p$, где p — давление газа; при этом для атмосферного воздуха β оценивают по приближенной формуле [6]: $\beta = 7,6 \times 10^{-6} (273/T)^3 \approx 5,73 \cdot 10^{-6}$ см, где $T \approx 5 \times 10^3$ К — температура плазмы. В то время как приведенный коэффициент ударной ионизации α/p в определенном диапазоне значений приведенного электрического поля E/p находят с помощью известной аппроксимации [6–9]:

$$\frac{\alpha}{p} = A_0 \exp\left(-\frac{B_0 p}{E}\right), \quad (3)$$

где A_0 и B_0 — константы, определяемые эмпирически для каждого газа. Для атмосферного воздуха $A_0 = 12,2$ пар ионов/см-торр; $B_0 = 365$ В/см-торр. Формула для скорости дрейфа электронов в воздухе имеет вид [6, 7]:

$$v_e = c_0 \frac{E_0}{p}, \quad (4)$$

где безразмерный коэффициент $c_0 = 3,3 \cdot 10^6$.

При оценке параметров искровой стадии разряда также важно учитывать ионный ток, который определяется интенсивностью вторичной эмиссии из катода и составляет [6]

$$i_i = i_e/\gamma, \quad (5)$$

где для электродов из вольфрама $\gamma \approx 0,025$ [6] — коэффициент вторичной эмиссии (второй коэффициент Таунсенда), принимается постоянным.

С учетом (1), (4) и (5) полный ток будет равен

$$i = i_e + i_i = \frac{1 + \gamma}{\gamma} \cdot \frac{ec_0}{pl^2} n_e u_p. \quad (6)$$

Чтобы теперь получить ВАХ разряда, необходимо рассчитать переходный процесс в разрядном контуре, который представлен в виде последовательной RLC-цепи (рис. 1), где искровой промежуток замещен генератором тока, являющимся функцией приложенного напряжения $u_p(t)$ согласно (6). Здесь предполагается, что пробой развивается из начального состояния, при котором емкость C предварительно заряжена до некоторого напряжения U_{C0} , заведомо большего, чем статический (пашеновский) потенциал зажигания данного искрового промежутка. По этой причине предпробойные явления (подготовительная стадия) на данном этапе не рассматриваются.

Таким образом, для описания динамики пробоя газового промежутка необходимо рассмотреть уравнение (2) с учетом (3) и (4) совместно с уравнением Кирхгофа для схемы замещения цепи разряда на рис. 1 при условии, что ток в цепи изменяется в соответствии с (6).

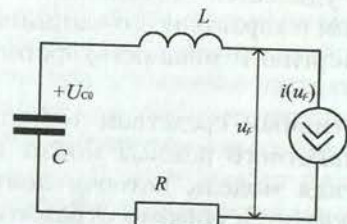


Рис. 1. Схема замещения разрядного контура, соответствующая искровой стадии

Относительно поверхностного разряда, характерного для используемых в составе ЕСЗ полупроводниковых свечей зажигания, следует отметить, что отличительной особенностью пробоя межэлектродного промежутка такой свечи является иницирование разряда в тройной точке металл-полупроводник-воздух. Важно, что в состав специальной полупроводниковой керамики запальных свечей входят соединения на основе оксидов титана, известным свойством которых являются высокие значения диэлектрической проницаемости: $\epsilon = 10^2 - 10^3$ [10]. При этом из результатов исследований разряда по поверхности диэлектриков [11] известно, что при условии наличия в разрядном промежутке диэлектрической поверхности происходит значительное усиление электрического поля в месте контакта катод-диэлектрик и напряженность поля в катодном контакте составляет

$$E_K = \epsilon \chi E_0, \quad (7)$$

где $\chi \sim 1$ — коэффициент усиления поля за счет микровыступов на катоде.

Таким образом, ВАХ искровой стадии разряда в полупроводниковой свече зажигания в рамках настоящей модели определяется исходя из следующих допущений:

1. Развитие пробоя свечного промежутка рассматривается из перенапряженного состояния, при котором напряжение U_{C0} заведомо выше пашеновского потенциала зажигания для заданного pl ; предшествующие этому состоянию процессы (подготовительная стадия) не рассматриваются.

2. Существенное снижение пробивного напряжения полупроводниковой свечи относительно пробивного напряжения чисто газового промежутка при том же значении pl учитывается в выражении для коэффициента ударной ионизации путем умножения в $\epsilon \chi$ раз напряженности электрического поля на катоде, которое усиливается вследствие присутствия в промежутке среды с высоким значением ϵ .

Итак, сформулированные допущения позволяют составить общую для газового разрядника и полупроводниковой свечи систему уравнений, описывающую динамику пробоя в схеме замещения на рис. 1, которая с учетом (2)–(7) запишется следующим образом:

$$L \frac{ec_0}{pl^2} \cdot \frac{1+\gamma}{\gamma} \cdot \frac{d}{dt} (n_e u_P) + R \frac{ec_0}{pl^2} \cdot \frac{1+\gamma}{\gamma} n_e u_P + u_C + u_P = 0,$$

$$C \frac{du_C}{dt} = \frac{ec_0}{pl^2} \cdot \frac{1+\gamma}{\gamma} n_e u_P, \\ \frac{dn_e}{dt} = \frac{A_0 c_0}{l^2} u_P n_e \exp\left(-\frac{B_0 pl}{\epsilon \chi u_P}\right) - \beta n_e^2. \quad (8)$$

Здесь принимается, что для разрядника с плоскими электродами $\epsilon \chi \approx 1$, $p \approx 25$ торр, $l = 4,5$ мм, а для серийной полупроводниковой свечи зажигания $\epsilon \chi \approx 100$, $p \approx 760$ торр, $l = 1$ мм. При этом для системы (8) будут справедливы следующие начальные условия

$$n_e(0) = N_0; \quad u_C(0) = U_{C0}; \quad u_P(0) = 0. \quad (9)$$

Система уравнений (8) решалась численно с использованием неявных разностных схем в пакете Mathematica-5. Результаты расчета и опытные осциллограммы приведены на рис. 2. Характер влияния параметров разрядной среды (параметра pl) в искровом разряднике и в свече зажигания на динамические характеристики разрядов показан на рис. 3а,б в виде параметрических графиков, полученных из расчетных и экспериментальных осциллограмм путем исключения времени. Аппроксимация осредненных характеристик разрядника и свечи зажигания приведена на рис. 3,в.

Из расчетных осциллограмм на рис. 2 видно, что на начальном участке, соответствующем нарастанию разрядного тока кривая напряжения спадает вначале круто, а затем ее спад замедляется, образуя так называемую «ступеньку». Представленные на рис. 3 результаты моделирования свидетельствуют о том, что с повышением pl возрастает высота «ступеньки» кривой напряжения на промежутке. Этот результат согласуется с известными экспериментальными данными [1, 3], иллюстрирующими характер влияния давления и длины разрядного промежутка на энергию разряда в свече зажигания вследствие повышения падения напряжения на ее электродах в течение искровой стадии разряда.

Для адекватного описания процесса формирования в ЕСЗ разрядных импульсов путем коммутации накопленной энергии через искровой разрядник важно учитывать наличие в схеме замещения рабочего контура как минимум двух разрядных элементов, не являющихся при этом активными источниками тока как в представленной выше модели.

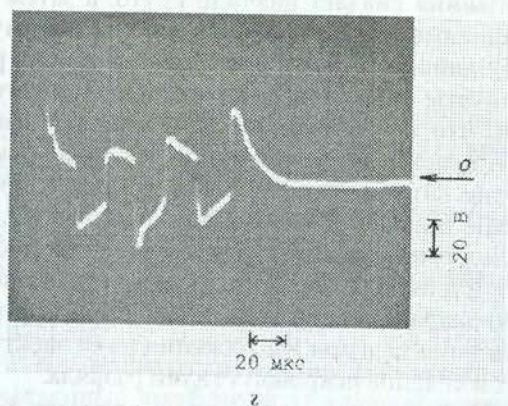
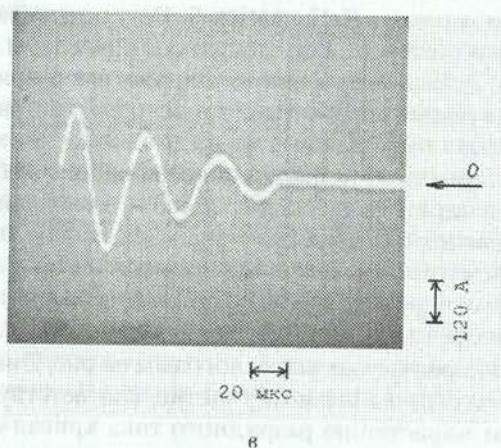
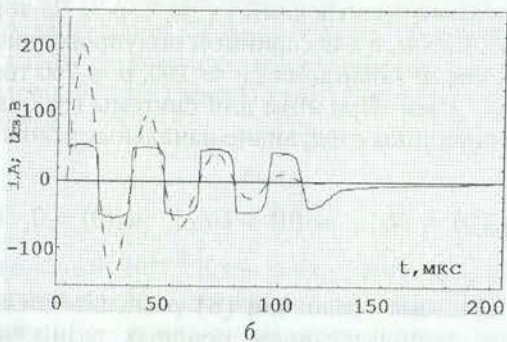
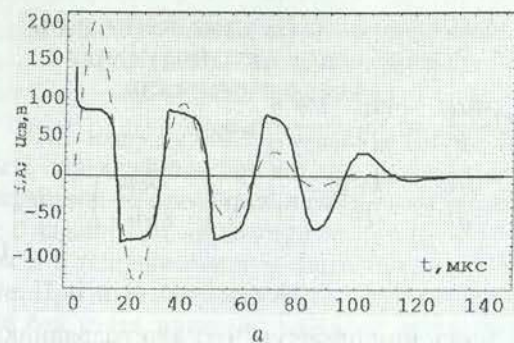


Рис. 2. Расчетные (а, б) осциллограммы тока (пунктир), напряжения (сплошная линия) и фотографии экспериментальных осциллограмм (в, з) единичного разрядного импульса для $U_{CO} = 2,4$ кВ; $N_0 = 10^4$; $L = 5 \cdot 10^{-5}$ Гн; $C = 5 \cdot 10^{-7}$ Ф; $R = 1,75$ Ом: а — разрядник при $p = 25$ торр; $l = 4,5$ мм и б — з — свеча зажигания при $p = 760$ торр; $l = 0,7$ мм

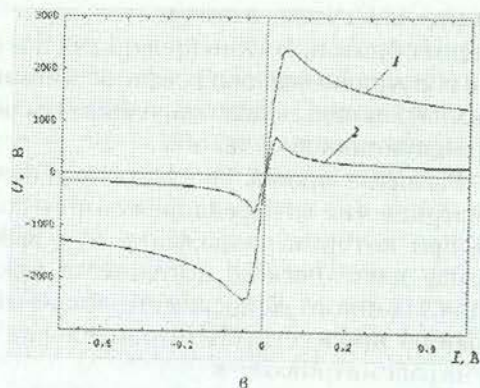
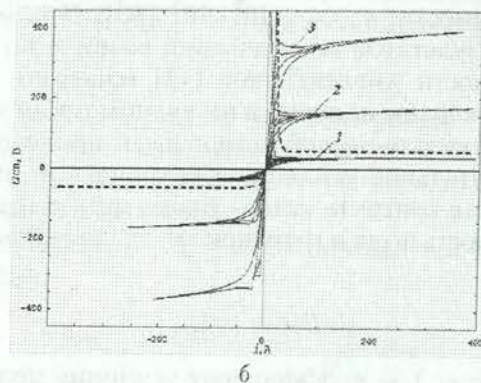
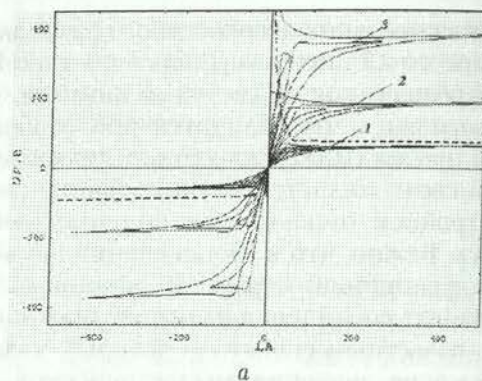


Рис. 3. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктир) динамические вольт-амперные характеристики сдвигного разрядного импульса: а — разрядник при $p = 5$ торр; $l = 4,5$ мм (кривая 1); $p = 20$ торр; $l = 2,5$ мм (кривая 2); $p = 35$ торр; $l = 3$ мм (кривая 3); б — свеча зажигания при $p = 1000$ торр; $l = 0,75$ мм (кривая 1); $p = 2000$ торр; $l = 2$ мм (кривая 2); $p = 3000$ торр; $l = 3$ мм (кривая 3); в — аппроксимированные зависимости для разрядника (кривая 1) и свечи зажигания (кривая 2)

По этой причине следующая модель строится для схемы замещения, где разрядник и свеча зажигания представляются как пассивные элементы, обладающие фиксированными ВАХ, рассчитанными для определенных значений pl и ϵ и инвертированными как напряжения в функции тока.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАКЕТНОГО РЕЖИМА

Нахождение оптимальных параметров пакетного режима работы ЕСЗ будет возможно только при соответствующем анализе особенностей процессов коммутации и восстановления электрической прочности разрядных элементов. При этом важно учитывать характер работы всех звеньев системы, влияющих на формирование параметров разрядных импульсов. В этом случае разветвленная схема замещения ЕСЗ будет содержать (рис. 4) генератор напряжения, зарядную RC-цепь и непосредственно разрядный контур, который в отличие от схемы на рис. 1 содержит два нелинейных сопротивления, которые обладают вольт-амперными характеристиками $f(i)$ и $\phi(i)$, рассчитанными из (8) соответственно для разрядника и свечи зажигания.

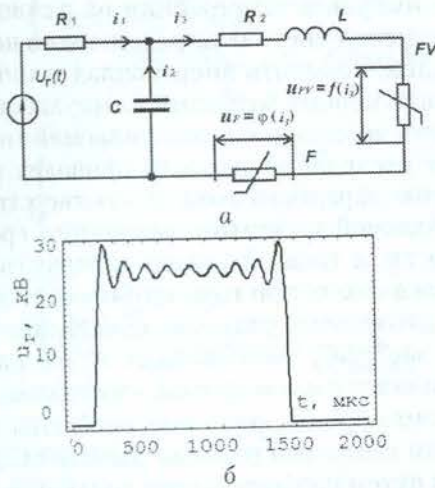


Рис. 4. Схема замещения ЕСЗ (а) и форма импульса генератора напряжения $u_r(t)$ (б)

Степень влияния разогрева плазмы на параметры разрядных импульсов в течение предпробойной стадии, а также на скорость восстановления электрической прочности устанавливается в соответствии с законом Саха и уравнением теплопроводности для столба разряда, которое в простейшем случае приводится к уравнению баланса мощностей [12]:

$$dH/dt = \sigma E^2 - P_{отв}, \quad (10)$$

где H — энтальпия столба разряда; σ — удельная проводимость газоразрядной плазмы; $P_{отв}$ — мощность, отводимая теплопроводностью и излучением.

Формула Саха для удельной проводимости плазмы имеет вид [3]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right), \quad (11)$$

где σ_0 — проводимость, соответствующая начальной плотности электронов; U_i — потенциал ионизации газа; k — постоянная Больцмана.

Для случая цилиндрической формы столба разряда, находящегося в локальном термическом равновесии, уравнения (10) и (11), рассмотренные совместно и преобразованные в соответствии с методикой, изложенной в [12] приобретают форму известной модели Майра для динамической проводимости разряда:

$$\theta \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2}{P_{отв}}, \quad (12)$$

где $g = \sigma \pi r^2 / l$ — интегральная динамическая проводимость столба разряда; $\theta = \rho c r^2 / \lambda \approx 10^{-6} - 10^{-5}$ с — тепловая постоянная времени искры (ρ — плотность плазмы; c — удельная теплоемкость; r — радиус столба разряда; λ — коэффициент теплопроводности) принята постоянной и рассчитана для средней температуры канала разряда $T \approx (3-5) \cdot 10^3$ К.

Согласно модели [12], отводимая мощность может быть выражена через ВАХ разряда, поэтому для разрядника $P_{отв} = f(i) \cdot i$, а для свечи $P_{отв} = \phi(i) \cdot i$. Ввиду того, что параметры рабочей среды (pd) в разряднике и в свече зажигания различны, величины постоянных времени, а также функции динамических проводимостей ($\theta, g(t)$ — для разрядника и $\vartheta, G(t)$ — для свечи) следует рассматривать отдельно. Тогда с учетом (12) система уравнений, описывающая процесс генерирования последовательности разрядных импульсов в схеме замещения ЕСЗ запишется следующим образом:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 = i_3, \\ u_C + L \frac{di_3}{dt} + \left(R_2 + \frac{1}{g} + \frac{1}{G}\right) i_3 = 0, \\ i_2 = C \frac{du_C}{dt}, \quad \theta \frac{dg}{dt} + g = \frac{i_3}{f(i_3)}, \\ R_1 i_1 - u_C = u_r(t), \\ \vartheta \frac{dG}{dt} + G = \frac{i_3}{\varphi(i_3)}. \end{cases} \quad (13)$$

Исходному состоянию схемы замещения будут соответствовать начальные условия

$$\begin{aligned} i_1(0) = i_2(0) = i_3(0) = 0; \quad u_C(0) = 0; \\ g(0) = 10^{-7}; \quad G(0) = 10^{-5}. \end{aligned} \quad (14)$$

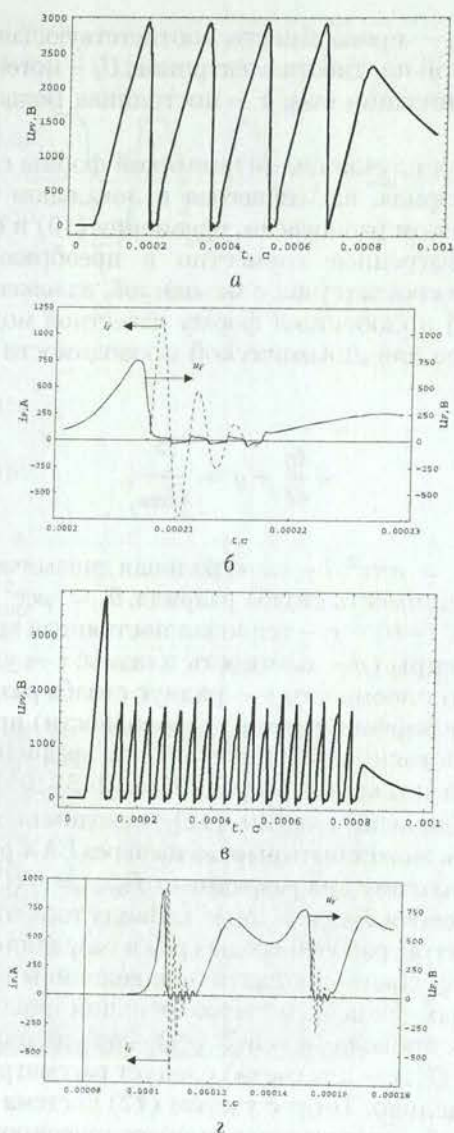


Рис. 5. Осциллограммы серий импульсов напряжения на разряднике (а), (в), и соответствующие им динамические вольт-амперные характеристики первых разрядных импульсов каждой серии для свечи зажигания (б), (z). Общие для всех случаев значения параметров: $L = 10^{-6}$ Гн; $R_2 = 0,45$ Ом

На рис. 5 показаны результаты численного решения (13) в виде осциллограмм серий импульсов напряжения на разряднике $u_{FV}(t) = i_F(t)/g(t)$, генерируемых в течение воздействия одного импульса $u_{\Gamma}(t)$, а также осциллограмм первых импульсов разрядного тока $i_F(t)$ и напряжения на свече зажигания $u_F(t) = i_F(t)/G(t)$ из каждой серии, соответствующих различным сочетаниям параметров R_1, C и $U_{\Gamma \max}$.

Видно, что увеличение количества импульсов в пакете путем изменения параметра $U_{\Gamma \max}/R_1 C$, отражающего скорость заряда накопительной емкости, при определен-

ном значении частоты следования приводит к нарушению устойчивости генерации разрядов при заметном снижении их пиковой мощности. Характер этого влияния, как известно, обусловлен скоростью нарастания тепловой неустойчивости в плазме, которая в определенных условиях (при возрастании частоты следования разрядов и собственной частоты колебаний разрядного тока) начинает превышать скорость восстановления электрической прочности разрядника и свечи зажигания. Из рис. 5, а следует, что на втором и последующих импульсах разрядник пробивается при напряжениях, существенно более низком, чем номинальное значение статического потенциала зажигания, заданного на уровне 2,5 кВ. С другой стороны, маленькая емкость в совокупности с высоким уровнем зарядного напряжения обеспечивают более крутой фронт импульса напряжения на разряднике, что позволяет достичь определенного перенапряжения, повысить энерговыход и пиковую мощность первых разрядных импульсов. В то же время повышение накапливаемой энергии за счет увеличения емкости приводит к возрастанию зарядного тока и, соответственно, потребляемой агрегатом зажигания средней мощности, а также снижает количество импульсов в пакете при том, что более мощные и более длительные разряды, следующие с высокой частотой, увеличивают износ разрядных элементов из-за эрозии электродов.

Таким образом, решение проблемы оптимизации пакетного режима работы ЕСЗ возможно путем подбора такого сочетания параметров схемы замещения, которому будет соответствовать, с одной стороны, максимальное значение энергии, вводимой в искровой канал в течение одного пакета импульсов, а с другой стороны — как можно более низкое значение потребляемой агрегатом зажигания средней мощности.

Эта задача решалась с помощью исследования системы уравнений (13) методами численного моделирования с целью определения динамических ВАХ и энергетических характеристик серий разрядов в свече зажигания в зависимости от параметров воздействующего импульса $u_{\Gamma}(t)$ и параметров схемы замещения. При этом значение энергии пакета разрядных импульсов W_{Π} определялось численным интегрированием в соответствии с выражением

$$W_{\Pi} = \int_0^{T_{\Pi}} \frac{i_3^2(t)}{G(t)} dt, \quad (15)$$

где T_{Π} — длительность воздействия одного импульса генератора напряжения $u_{\Gamma}(t)$, равная длительности пакета разрядных импульсов.

Средняя потребляемая агрегатом зажигания мощность вычислялась для заданного значения частоты следования пакетов $\nu = T_{C.п.}^{-1} = 1$ Гц по формуле

$$P_{ср} = \frac{1}{T_{C.п.}} \int_0^{T_{C.п.}} i_1(t) u_{\Gamma}(t) dt. \quad (16)$$

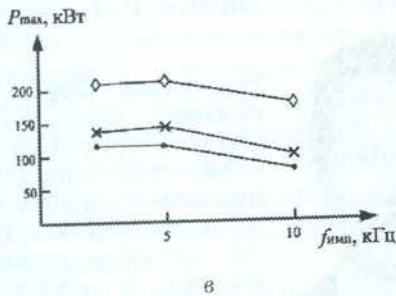
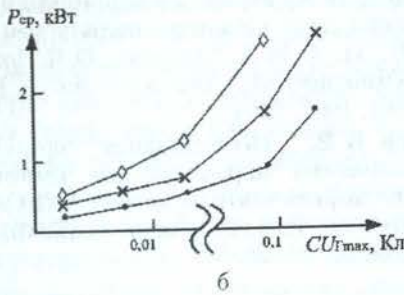
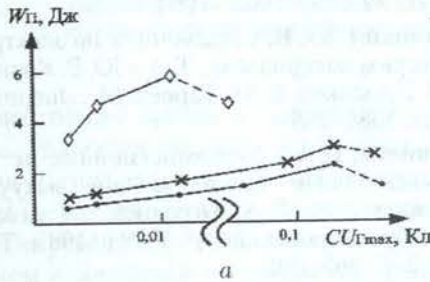


Рис. 6. Рассчитанные зависимости энергии (а) пакета разрядных импульсов и средней потребляемой ЕСЗ мощности (б) от параметра $U_{\Gamma \max} C$ (• — 2 импульса в пакете, $f_{имп} = 1$ кГц, $T_{\Pi} = 1$ мс; × — 5 импульсов в пакете, $f_{имп} = 3$ кГц, $T_{\Pi} = 1,5$ мс; ◇ — 20 импульсов в пакете, $f_{имп} = 7$ кГц, $T_{\Pi} = 3$ мс); в — зависимость пиковой мощности разрядов от частоты следования (• — $C = 0,2$ мкФ; × — $C = 0,5$ мкФ; ◇ — $C = 1$ мкФ). Пунктиром обозначены участки кривых, соответствующие снижению энерговклада за счет уменьшения начального количества импульсов в пакете

На рис. 6,а, б приведены рассчитанные по (15) и (16) зависимости энергии, выделяемой в искровом канале в течение пакета раз-

рядных импульсов и средней мощности, потребляемой ЕСЗ, от параметра $U_{\Gamma \max} C$. Данный параметр имеет размерность [Кл] и характеризует скорость заряда накопительной емкости, при этом от него также косвенным образом зависят как пробивное напряжение разрядника, так и коммутируемый заряд. Зависимости среднего значения пиковой мощности пакета разрядных импульсов от частоты $f_{имп}$ их следования, также полученные в результате численного моделирования для различных значений емкости C , показаны на рис. 6,в.

Полученные зависимости позволяют определить оптимальное значение величины накопительной емкости и оптимальный режим работы преобразователя напряжения (форма $u_{\Gamma}(t)$), соответствующие максимальному энерговыделению в разрядном канале при работе ЕСЗ в пакетном режиме. В результате моделирования обнаружено, что, начиная с определенного значения параметра $U_{\Gamma \max} C$, увеличение как накопительной емкости, так и прикладываемого напряжения, приводят к снижению величины энерговклада, т. е. зависимость $W_{\Pi}(U_{\Gamma \max} C)$ имеет ярко выраженный максимум. Также установлено, что для длительности воздействия T_{Π} импульса напряжения $u_{\Gamma}(t)$ характерно некоторое критическое значение, превышение которого не приводит к увеличению числа импульсов в пакете.

Причины такой зависимости связаны с развитием тепловой неустойчивости в разрядном канале, приводящей к снижению электрической прочности разрядных элементов, что применительно к ЕСЗ может выражаться в развитии аварийных режимов. Примечательно, что указанные особенности качественно согласуются с экспериментальными результатами работы [13], где с помощью пакетного режима генерирования разрядов осуществлялось возбуждение активной среды газовых лазеров.

В то же время, сопоставление зависимостей $W_{\Pi}(U_{\Gamma \max} C)$ и $P_{ср}(U_{\Gamma \max} C)$ позволяет определить оптимальное сочетание величины энерговклада и потребляемой агрегатом зажигания средней мощности. При этом величина $P_{ср}$ также может быть подвергнута оптимизации за счет подбора соответствующего периода следования $T_{C.п.}$ пакетов. Можно видеть, что один и тот же уровень энерговклада в определенных условиях может быть достигнут за счет генерирования большего количества менее мощных импульсов при более низком значении потребляемой мощности.

Если не принимать особых мер, то, как уже было отмечено, частота следования разрядов в пакете будет ограничивать их пиковую мощность (рис. 6,в) по уже упомянутой причине несоответствия временного интервала между импульсами и времени деионизации искровых промежутков. Однако плотная упаковка разрядов в более длительный пакет должна повысить эффективность воспламенения топливовоздушной смеси, что может оказать положительное воздействие как на процесс высотного запуска ГТД (при возрастании периода индукции воспламенения), так и на процесс запуска при больших скоростях полета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложена математическая модель, отражающая процесс генерирования серий разрядных импульсов в емкостной системе зажигания ГТД. Модель основана на рассчитанных для единичного разряда вольт-амперных характеристиках и учитывает влияние теплового самовоздействия разрядов на процесс восстановления электрической прочности искровых промежутков. Оценена возможность реализации пакетного режима в ЕСЗ с целью определения оптимальных параметров ЕСЗ при условии максимального энерговыделения в искре в течение пакета разрядных импульсов, а также минимума потребляемой системой мощности. Практическая реализация пакетного режима с наиболее оптимальными параметрами в условиях реальных камер сгорания ГТД представляет интерес в плане повышения эффективности процесса воспламенения как в процессе высотного запуска, так и при запуске на высоких скоростях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Левфевр, А.** Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Левфевр. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. **Foster, H. H.** Effect of spark repetition rate on the ignition limits of a single tubular combustor / H. H. Foster. NASA RM E51J18, 1951.
3. **Гизатуллин, Ф. А.** Емкостные системы зажигания / Ф. А. Гизатуллин. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
4. **Гизатуллин, Ф. А.** Об одном подходе к оценке параметров проектируемых систем зажигания газотурбинных двигателей / Ф. А. Гизатуллин, А. В. Краснов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 2. С. 25–27.

5. **Гизатуллин, Ф. А.** Методология определения параметров систем зажигания для ГТД с различными условиями воспламенения смеси / Ф. А. Гизатуллин // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6, № 2 (13). С. 67–72.
6. **Райзер, Ю. П.** Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. М.: Наука, 1987. 592 с.
7. **Мик, Дж.** Электрический пробой в газах / Дж. Мик, Дж. Крэге. М.: ИЛ, 1960. 605 с.
8. **Месяц, Г. А.** Пикосекундная техника больших мощностей / Г. А. Месяц, М. И. Яландин // УФН. 2005. Т. 175, № 3. С. 225–246.
9. **Месяц, Г. А.** Законы подобия в импульсных газовых разрядах / Г. А. Месяц // УФН. 2006. Т. 176, № 10. С. 1069–1091.
10. **Корицкий, Ю. В.** Справочник по электротехническим материалам: Т. 1 / Ю. В. Корицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. М.: Энергоатомиздат, 1986. 368 с.
11. **Литвинов, Е. А.** Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах / Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский // УФН. 1983. Т. 139, вып. 2. С. 265–302.
12. **Кулаков, Н. А.** Устойчивость горения электрической дуги (Низкотемпературная плазма. Т. 5) / Н. А. Кулаков, О. Я. Новиков, А. Н. Тимошевский. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1992. 199 с.
13. **Осипов, В. В.** Исследование предельных энергетических характеристик комбинированного разряда в потоке газов / В. В. Осипов, М. Г. Иванов, В. В. Лисенков // ЖТФ. 1998. Т. 68, № 5. С. 33–38.

ОБ АВТОРАХ



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



Зиновьев Константин Владимирович, асп. той же каф. Дипл. инж. по электрооборуд. ЛА и наземн. транспорта (УГАТУ, 2002).