

УДК 621.452.3

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН, А. В. ЛОБАНОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЕ ЗАЖИГАНИЯ

Анализируются схемотехнические решения нового класса импульсно-плазменных систем зажигания. Разработаны схемотехническая и имитационная компьютерные модели процессов в разрядных цепях базовой схемы. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность разработанных моделей. *импульсно-плазменная система зажигания; разрядные процессы; схемотехническая и имитационная компьютерные модели; результаты эксперимента*

Значительный рост скоростей и высот полета, увеличение мощности двигателей приводят к усложнению функций, выполняемых летательными аппаратами, и ужесточению требований, предъявляемых не только к силовым установкам, но и к сопутствующим устройствам, в том числе к электрическим системам зажигания.

Основной недостаток широко применяемых в настоящее время емкостных систем зажигания вытекает из принципа действия и заключается в импульсном характере разрядов в свече, что может явиться причиной уменьшения воспламеняющей способности в случае, если стабилизация пламени в устройствах горения осуществляется не за счет аэродинамических свойств камеры сгорания, а за счет подвода энергии от свечи зажигания. В этом случае система зажигания может не обеспечить требуемой пусковой характеристики камеры сгорания или пускового воспламенителя [1].

Существенно иное положение складывается при применении плазменных систем зажигания с подводом энергии в виде плазменной струи, обеспечивающей надежное воспламенение смеси даже в случае отсутствия эффективной аэродинамической стабилизации пламени. Однако в настоящее время плазменные системы зажигания не получили широкого применения в авиационных ГТД из-за необходимости использования мощных источников питания, обладающих значительными массой и габаритами, а также из-за низкого ресурса плазменных свечей зажигания [1, 2].

В настоящее время обосновывается возможность использования емкостных систем зажигания, занимающих промежуточное положение между импульсными искровыми и непрерывными плазменными. Эффект от применения таких систем зажигания основывается на известном экспериментальном результате, описанном в [3]. При электроискровом способе стабилизации пламени в устройствах горения, например, в пусковых воспламенителях, уменьшение скорости подвода энергии к топливовоздушной смеси приводит к устойчивому расширению пусковой характеристики.

Один из вариантов подобных схем систем зажигания с низкой скоростью подвода энергии накопительного конденсатора представлен на рис. 1 [3, 4]. В этой схеме дополнительно с высоковольтным накопительным конденсатором  $C1$  используется низковольтный конденсатор большой емкости  $C2$ , причем напряжение заряда конденсатора  $C2$  ниже пробивного напряжения свечи  $F$ . Конденсатор  $C1$  является вспомогательным, он необходим для инициирования разряда в свече после пробоя разрядника  $FV$ . Таким образом, в свече обеспечивается сочетание двух видов разрядов: мощного короткого за счет емкости  $C1$  и маломощного длительного за счет емкости  $C2$ ; система зажигания в данном случае относится к классу комбинированных или импульсно-плазменных.

По сравнению с классической емкостной системой зажигания данная схема при сопоставимой потребляемой мощности обеспечивает достижение следующих положительных эффектов. Во-первых, снижаются потери на

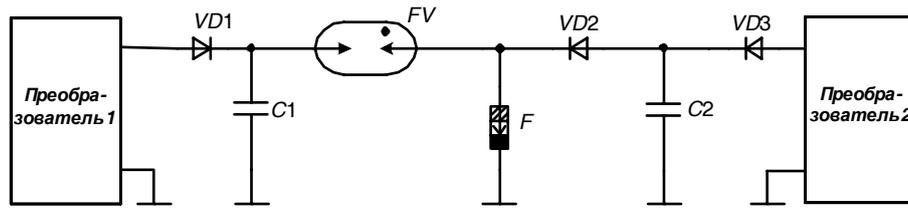


Рис. 1. Импульсно-плазменная система зажигания

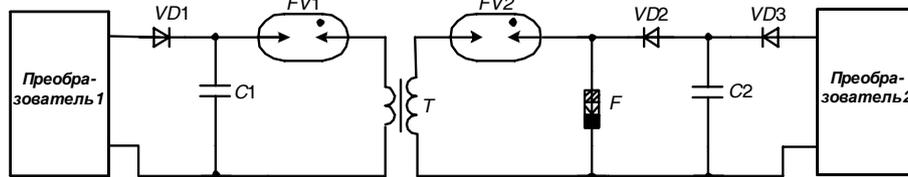


Рис. 2. Импульсно-плазменная система зажигания повышенной эффективности

копленной энергии по причине отсутствия в основной разрядной цепи коммутирующего элемента, во-вторых, сочетание в свече двух разрядов разной мощности улучшает условия воспламенения топливоздушнoй смеси [1], и, в-третьих, как отмечалось выше, снижение скорости подвода энергии искровых разрядов в свече ведет к расширению пусковой характеристики устройства горения при определенных условиях организации процессов стабилизации пламени.

Основной недостаток описанной схемы связан с общей низковольтностью, такая система зажигания рассчитана на использование свечей с невысоким пробивным напряжением, например, полупроводниковых свечей.

Для повышения эффективности и расширения функциональных возможностей данной схемы, авторами предложена усовершенствованная схема, представленная на рис. 2 [5].

Особенностью приведенной схемы является повышенное напряжение, прикладываемое к свече. Накопительный конденсатор  $C1$  разряжается через первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Под действием высоковольтного импульса на вторичной обмотке трансформатора происходит пробой дополнительного коммутирующего элемента  $FV2$  и свечи зажигания  $F$ . Наличие высокого напряжения со стороны высоковольтного трансформатора повышает надежность искрообразования в свече, при этом расширяются функциональные возможности системы зажигания, в качестве свечи могут быть использованы все типы авиационных свечей зажигания. Коммутирующий элемент  $FV2$  предотвращает разряд конденсатора  $C2$  до пробоя свечи  $F$ .

В статье решаются задачи моделирования и исследования разрядных процессов в базовой схеме импульсно-плазменной системы зажигания, приведенной на рис. 1.

В ходе схемотехнического и имитационного компьютерного моделирования на первом этапе приняты следующие основные допущения:

- 1) свеча зажигания заменена линейным активным сопротивлением,
- 2) разрядник представлен идеальным ключом,
- 3) преобразователи представлены эквивалентными источниками ЭДС.

Разработанная схемотехническая модель комбинированной системы зажигания в среде Matlab 6.5 показана на рис. 3, где обозначено:

$r1, r2, r3$  – эквивалентные активные сопротивления полупроводниковых элементов  $VD1, VD2$  и  $VD3$ ;

$K1-K4$  – ключевые элементы;

$L1, L2$  – индуктивности цепей разряда конденсаторов  $C1$  и  $C2$ ;

$R$  – активное сопротивление свечи зажигания.

Время срабатывания ключей  $K1-K4$  подобрано таким образом, что сначала заряжаются накопительные конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , а затем ключи  $K1$  и  $K4$  размыкают цепи источников питания  $E1$  и  $E2$  и срабатывают ключи  $K2$  и  $K3$ , через которые заряженные накопительные конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разряжаются на свечу.

На рис. 4 приведена характерная кривая разрядного тока  $i$  через свечу, полученная в ходе схемотехнического моделирования при следующих параметрах элементов схемы на рис. 1:

$$C1 = 0,25 \text{ мкФ}, \quad C2 = 370 \text{ мкФ},$$

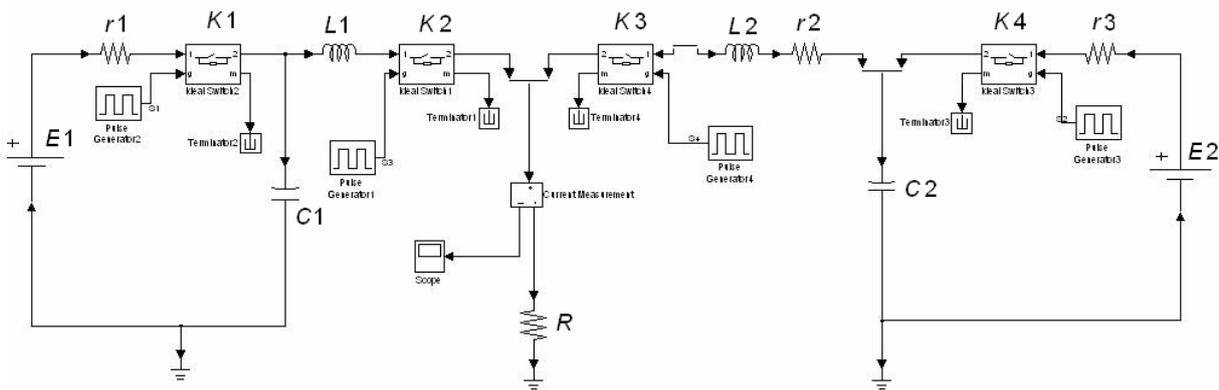


Рис. 3. Схематехническая модель

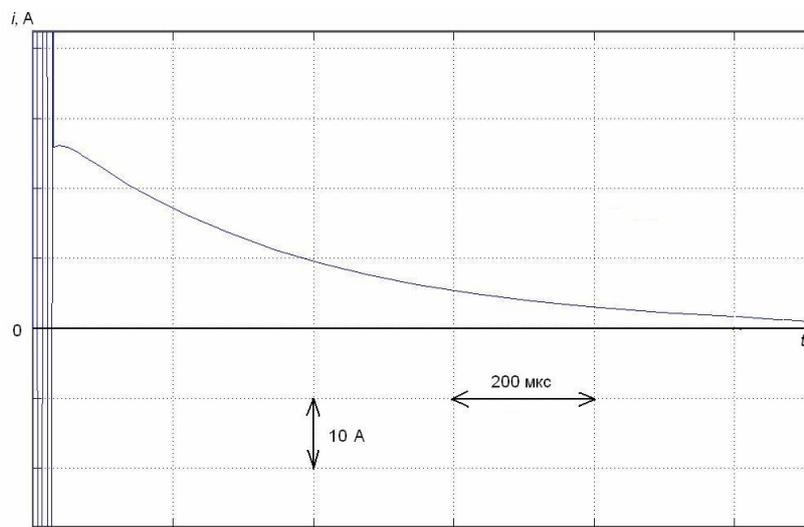


Рис. 4. Осциллограмма разрядного тока при схематехническом моделировании

$$L1 = 20 \text{ мкГн}, L2 = 52 \text{ мкГн}, \\ E1 = 2200 \text{ В}, E2 = 100 \text{ В}.$$

представлена на рис. 5, где  $U_p$  — падение напряжения в разряднике.

Подтверждение адекватности модели по результатам экспериментальных исследований и результаты учета нелинейных свойств свечи зажигания будут приведены ниже.

Принятые выше допущения остаются справедливыми и при математическом моделировании процессов в импульсно-плазменной системе зажигания, необходимом для составления имитационной компьютерной модели.

Кроме того, так как длительность заряда накопительных конденсаторов до момента пробоя разрядника значительно превышает длительность разрядной стадии, то влияние преобразователей на разрядные процессы не учитывается.

С учетом принятых допущений составим схему замещения разрядных цепей импульсно-плазменной системы зажигания, которая

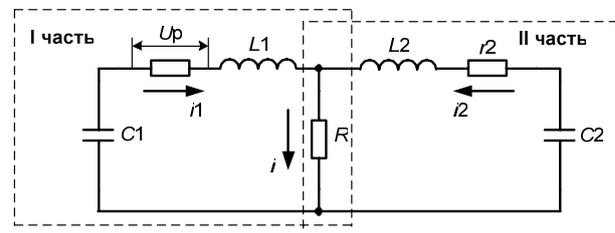


Рис. 5. Схема замещения

Найдем законы изменения тока через свечу отдельно для высоковольтной и низковольтной частей схемы (части 1 и 2 на рис. 5) для их последующего совмещения.

Для высоковольтной части схемы запишем:

$$\begin{cases} U_{c1} + U_p + L1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R = 0, \\ i_1 = C1 \frac{dU_{c1}}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Решая систему уравнений (1) при допущении, что  $U_p = 0$  после пробоя разрядника, получаем выражение для первой составляющей тока через свечу [6]:

$$i_1(t) = -\frac{E1}{\omega \cdot L1} e^{-\delta \cdot t} \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $\omega = \sqrt{\frac{1}{L1C1} - \frac{R^2}{4L1^2}}$ ;  $\delta = \frac{R}{2L1}$ .

Система уравнений для низковольтной части схемы на рис. 5 выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} U_{c2} + i_2 r_2 + L2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R = 0, \\ i_2 = C2 \frac{dU_{c2}}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что разрядные процессы в низковольтном контуре (часть 2 на рис. 5) носят апериодический характер вследствие соотношения параметров цепи, получим выражение для второй составляющей тока через свечу:

$$i_2(t) = \frac{E2}{L2(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (4)$$

где  $p_{1,2} = -\frac{R+r_2}{2L_2} \pm \sqrt{\frac{(R+r_2)^2}{4L_2^2} - \frac{1}{L_2 C_2}}$ .

Полный ток через свечу зажигания:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad (5)$$

или

$$\begin{aligned} i(t) = & -\frac{E1}{\sqrt{\frac{1}{L1C1} - \frac{R^2}{4L1^2}} L1} e^{-\frac{R}{2L1} t} \times \\ & \times \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L1C1} - \frac{R^2}{4L1^2}} t\right) - \\ & - \frac{E2}{2L2 \sqrt{\frac{(R+r_2)^2}{4L2^2} - \frac{1}{L2C2}}} \times \\ & \times \left( e^{\left(-\frac{R+r_2}{2L_2} + \sqrt{\frac{(R+r_2)^2}{4L_2^2} - \frac{1}{L_2 C_2}}\right) t} - \right. \\ & \left. - e^{\left(-\frac{R+r_2}{2L_2} - \sqrt{\frac{(R+r_2)^2}{4L_2^2} - \frac{1}{L_2 C_2}}\right) t} \right). \quad (6) \end{aligned}$$

На рис. 6 приведена полученная при математическом моделировании кривая разрядного тока через свечу при следующих параметрах схемы на рис. 1:

$$\begin{aligned} C1 = 0,25 \text{ мкФ}, \quad C2 = 370 \text{ мкФ}, \\ L1 = 20 \text{ мкГн}, \quad L2 = 52 \text{ мкГн}, \\ E1 = 2200 \text{ В}, \quad E2 = 100 \text{ В}. \end{aligned}$$

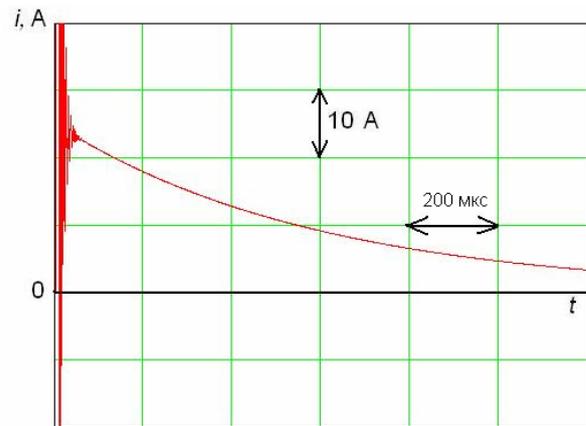


Рис. 6. Осциллограмма разрядного тока при математическом моделировании

Для построения кривой была написана программа в среде Mathcad 2001 Rus.

На основе полученных результатов и известной технологии имитационного моделирования [7, 8] разработана имитационная модель системы зажигания, показанная на рис. 7.

Для подтверждения адекватности разработанных моделей проведены экспериментальные исследования на специально разработанном стенде, схема которого представлена на рис. 8.

В разрядной цепи предусматривалась возможность изменения основных параметров разрядных цепей, в том числе:

1) емкости основного конденсатора  $C2$  в пределах от 100 до 370 мкФ;

2) индуктивности катушек, включаемых в разрядную цепь  $L2$  в пределах от 20 до 130 мкГн в условиях постоянства их активных сопротивлений.

Задача экспериментальных исследований заключалась в получении осциллограмм разрядного тока, падения напряжения в свече и напряжения на низковольтном накопительном конденсаторе в широком диапазоне изменения параметров элементов, соответствующем предполагаемым параметрам при реальном использовании импульсно-плазменных систем зажигания.

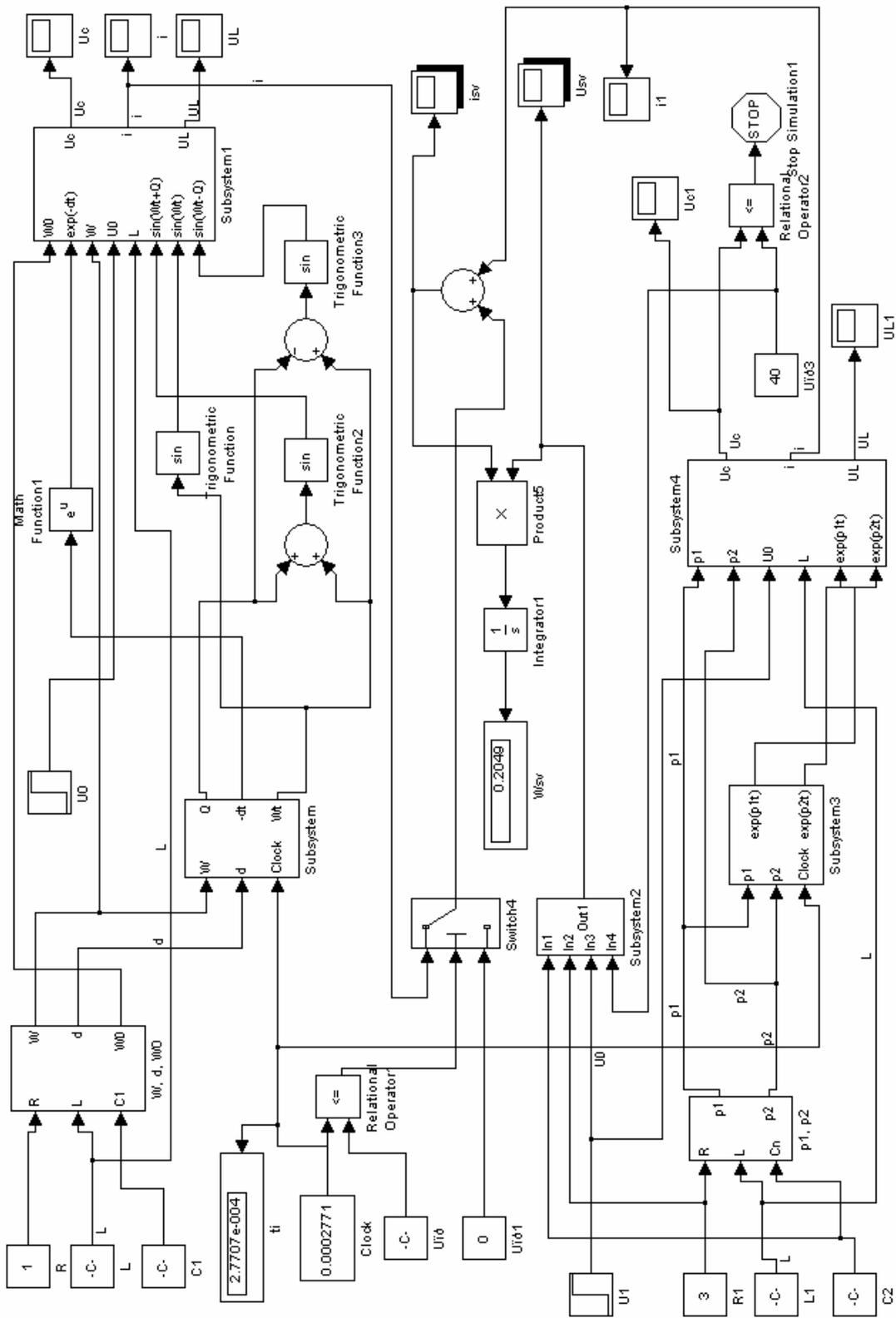


Рис. 7. Имитационная модель импульсно-плазменной системы зажигания

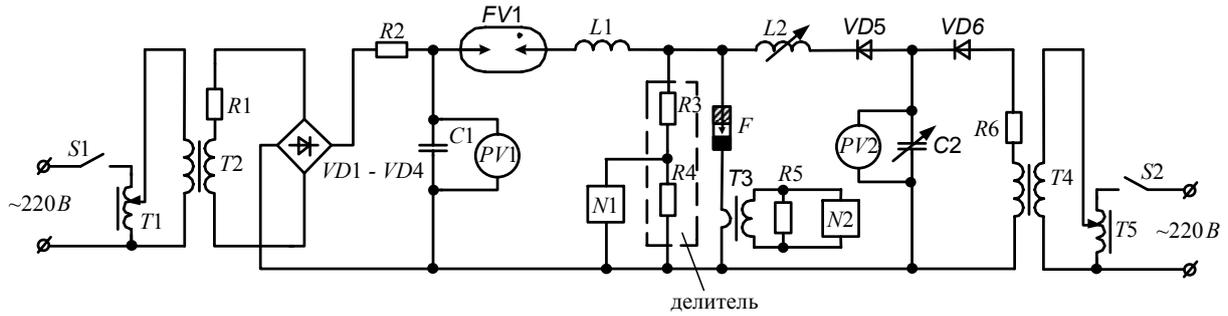


Рис. 8. Электрическая схема экспериментального стенда

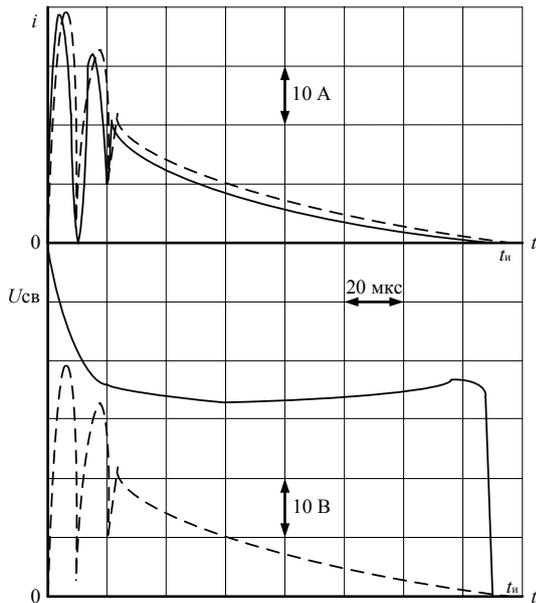


Рис. 9. Осциллограммы разрядных процессов ( $C_2 = 100 \text{ мкФ}$ ): — — экспериментальные кривые, - - - - - теоретические кривые

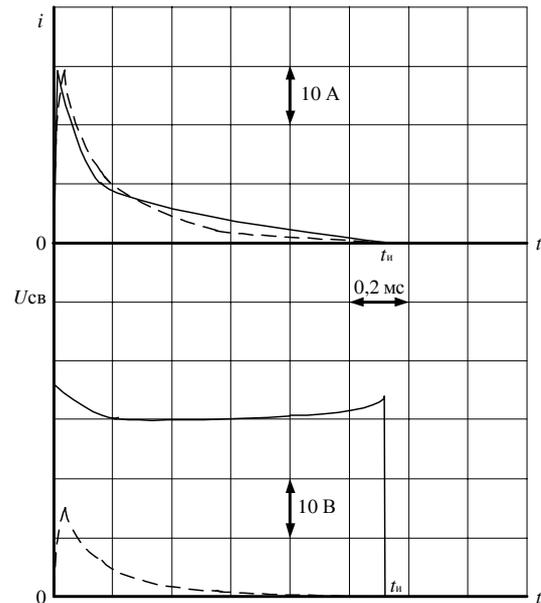


Рис. 10. Осциллограммы разрядных процессов ( $C_2 = 370 \text{ мкФ}$ ): — — экспериментальные кривые, - - - - - теоретические кривые

В качестве делителя напряжения для регистрации напряжения в свече и на конденсаторе использовался высокоомный омический делитель напряжения, в качестве датчика тока использовался измерительный трансформатор тока.

На рис. 9–10 приведены характерные осциллограммы разрядных процессов при разных сочетаниях параметров схемы. На этих же рисунках представлены теоретические кривые, полученные в ходе имитационного моделирования при параметрах, соответствующих параметрам в экспериментальной схеме.

На рис. 11 приведена осциллограмма напряжения на основном конденсаторе при разряде, совмещенная с теоретической кривой, полученной в ходе имитационного моделирования при параметрах, соответствующих параметрам в экспериментальной схеме, где обозначено  $U_{\text{ост}}$  — остаточное напряжение

на накопительном конденсаторе после погасания разряда в свече.

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что  $U_{\text{ост}}$  незначительно изменяется при различных сочетаниях параметров разрядной цепи и колеблется в пределах 30–40 В.

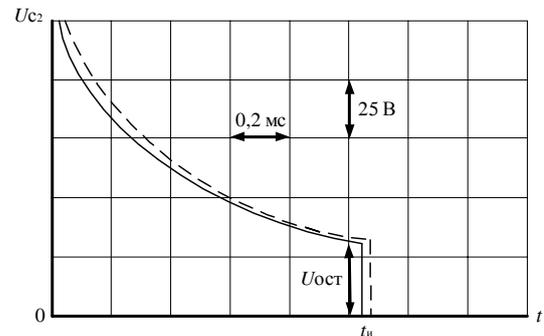


Рис. 11. Осциллограмма напряжения на основном конденсаторе ( $C_2 = 370 \text{ мкФ}$ ): — — экспериментальные кривые, - - - - - теоретические кривые

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1) расхождения между экспериментальными полученными и теоретическими кривыми разрядного тока и напряжения на низковольтном конденсаторе не превышают 15%. Это свидетельствует о том, что допущение о линейности свечи в ходе моделирования является корректным по отношению к току разряда и напряжению на основной емкости. Этот результат объясняется тем, что доля активного сопротивления искрового разряда по сравнению с эквивалентным сопротивлением всей цепи мала;

2) теоретическая кривая падения напряжения в свече не соответствует экспериментальной; для уточнения имитационной модели необходимо учесть нелинейность свечи путем использования аппроксимации реальной кривой падения напряжения в свече.

В процессе анализа осциллограмм падения напряжения в свече, полученных при различных сочетаниях емкости основного конденсатора и индуктивности разрядной цепи, выявлено, что падение напряжения в свече относительно стабильно и незначительно меняется при варьировании параметров разрядной цепи. На основании экспериментальных данных кривую падения напряжения в свече опишем функцией вида:

$$U_{св} = G + H \left( t - \frac{t_{и}}{2} \right)^2, \quad (7)$$

где  $G$  и  $H$  — постоянные величины, определяемые из экспериментальных кривых,

$t_{и}$  — длительность разряда.

Так как при реальных сочетаниях параметров основной разрядной цепи процесс разряда является однополярным и его длительность определяется в основном емкостью накопительного конденсатора  $C2$ , в целях упрощения расчета длительности разряда пренебрегаем индуктивностью разрядной цепи  $L2$ .

Определим длительность разряда  $t_{и}$  исходя из выражения, описывающего разряд основного конденсатора  $C2$  на активное сопротивление разрядной цепи:

$$U_{c2} = U_0 e^{-\frac{t}{R'C2}}, \quad (8)$$

где  $U_0$  — начальное напряжение заряда накопительного конденсатора,

$R'$  — активное сопротивление разрядной цепи.

При  $t = t_{и}$  выражение (8) запишется в виде:

$$U_{ост} = U_0 e^{-\frac{t_{и}}{R'C2}}, \quad (9)$$

где  $U_{ост}$  — остаточное напряжение на накопительном конденсаторе после погасания разряда.

Из (9) следует

$$t_{и} = R'C2 \ln \frac{U_0}{U_{ост}}. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (7) запишется в виде

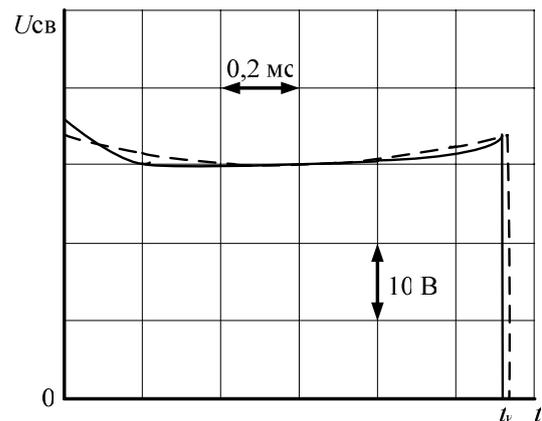
$$U_{св} = G + H \left( t - \frac{1}{2} R'C2 \ln \frac{U_0}{U_{ост}} \right)^2. \quad (11)$$

Из сравнения экспериментальных кривых падения напряжения в свече для различных сочетаний параметров схемы определены параметры  $G$  и  $H$ , входящие в выражение (11):

$$\begin{aligned} G &= 31 \text{ В}, \\ H &= \frac{Kp}{C2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $Kp$  — коэффициент пропорциональности,  $Kp = 10^3$  Кл/сек.

С учетом (11) и (12) проведено уточнение имитационной модели разрядных процессов в системе зажигания. Результаты моделирования представлены на рис. 12.



**Рис. 12.** Осциллограммы падения напряжения в свече ( $C2 = 370$  мкФ):  
— — — экспериментальные кривые,  
- - - - - уточненная теоретическая кривая

Расхождение между экспериментально полученными и уточненными теоретическими кривыми падения напряжения в свече не превышает 10%, что подтверждает адекватность имитационной модели.

Результаты эксперимента позволяют также подтвердить адекватность и схемотехнической модели, что продемонстрировано на рис. 13 при следующих параметрах элементов схемы на рис. 1:

$$\begin{aligned} C1 &= 0,25 \text{ мкФ}, & C2 &= 100 \text{ мкФ}, \\ L1 &= 20 \text{ мкГн}, & L2 &= 52 \text{ мкГн}, \\ E1 &= 2200 \text{ В}, & E2 &= 100 \text{ В}. \end{aligned}$$

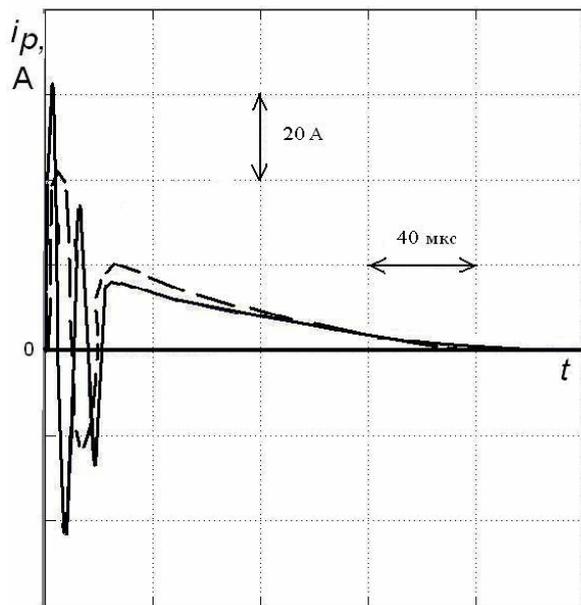


Рис. 13. Оциллограмма разрядного тока при схемотехническом моделировании: — — экспериментальная кривая, - - - - - теоретическая кривая

Таким образом, разработаны схемотехническая и имитационная модели разрядных процессов применительно к новому классу импульсно-плазменных систем зажигания. Обе модели могут использоваться на различных этапах исследования и оценки эффективности систем зажигания. Схемотехническая модель, не учитывающая нелинейность свечи, пригодна для предварительной, грубой оценки качества разрядных процессов.

Имитационную модель предполагается использовать для решения задач исследования, оптимизации параметров систем зажигания и создания методик их оценки и проектирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гизатуллин, Ф. А.** Емкостные системы зажигания / Ф. А. Гизатуллин. Уфа : УГАТУ, 2002. 249 с.
2. **Лобанов, А. В.** Перспективы совершенствования плазменных систем зажигания / А. В. Лобанов, Ф. А. Гизатуллин // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы : межвуз. науч. сб. Уфа, 2006. С. 248–253.
3. **Гизатуллин, Ф. А.** Исследование разрядных процессов в полупроводниковых свечах и разработка емкостных систем зажигания повышенной эффективности / Ф. А. Гизатуллин, Л. И. Алимбеков, Ю. Н. Прохорчев // Технический отчет № 78046793, инв. № Б 818184, Уфа, 1979.
4. **Гизатуллин, Ф. А.** Патент на полезную модель № 59159. Комбинированная система зажигания / Ф. А. Гизатуллин, А. В. Лобанов; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34.
5. **Гизатуллин, Ф. А.** Патент на полезную модель № 62664. Комбинированная система зажигания / Ф. А. Гизатуллин, А. В. Лобанов, Ш. Б. Нуриев; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
6. **Лобанов, А. В.** Математическое моделирование разрядных процессов в комбинированной системе зажигания // Актуальные проблемы в науке и технике: сб. ст. 2-й регион. зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых, 13-17 февраля 2007. Т. 2. Уфа : Технология, 2007. С. 190–195.
7. **Гультияев, А. К.** MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие / А. К. Гультияев. СПб. : КОРОНА принт, 1999. 288 с.
8. **Дьяконов, В. П.** MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дьяконов. М. : СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.

#### ОБ АВТОРАХ



**Гизатуллин Фарит Абдулганеевич**, проф., зав. каф. электрооборуд. ЛА и наземн. транспорта. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 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.



**Лобанов Андрей Владимирович**, асп. каф. ЭЛА и НТ. Дипл. инженер по электрооборудованию летательн. аппаратов (УГАТУ, 2004). Работает над диссертацией по проблеме разработки и исследования импульсно-плазменных систем зажигания.