

УДК 621.452.3

20

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН, В. Н. ХУДЯЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЕ ЗАЖИГАНИЯ

Разработана имитационная модель плазменной системы зажигания. Теоретически и экспериментально исследованы особенности электромагнитных процессов. Проведен анализ устойчивости горения дуги в плазмотроне при питании от источника с минимально допустимой мощностью. Оценено влияние параметров плазменной системы на устойчивость горения дуги. *Имитационное моделирование; плазменное зажигание; плазмотрон*

Плазменные системы зажигания имеют хорошие перспективы использования для газотурбинных двигателей с высотным запуском, характеризующимся особо напряженными условиями воспламенения горючей смеси. В известной литературе исследованию процессов в них уделялось недостаточное внимание. Полученные математические модели не отражают в полной мере динамических особенностей физических процессов в плазменных системах и приводимые в опубликованных работах рекомендации не учитывают полностью условия эксплуатации и требования, предъявляемые к подобным системам авиационных газотурбинных двигателей [1, 2, 3].

Под плазменной системой зажигания понимают совокупность источника питания и плазмотрона. Электрофизические особенности сжатой дуги и специфика плазменно-дуговой технологии обусловили создание специальных источников питания плазмотронов. Наибольшее распространение в настоящее время получили плазмотроны, питаемые постоянным током. Плазмотроны постоянного тока с источником питания на основе статических выпрямителей, незначительно уступающая по первоначальным затратам и эксплуатационным расходам плазмотронам переменного тока, обеспечивают большую стабильность горения дуги и точность поддержания заданных параметров.

Источники, используемые для питания плазмотронов постоянного тока, весьма разнообразны. По форме внешней вольт-амперной характеристики они могут быть разделены на источники питания с жесткой и крутопадающей внешней характеристикой. Источники питания с жесткой внешней харак-

теристикой могут применяться либо только для питания специализированных плазмотронов, имеющих возрастающую вольт-амперную характеристику, либо с последовательным включенным балластным сопротивлением, что снижает коэффициент полезного действия установок и неприемлемо по экономическим соображениям. Поэтому источники питания с крутопадающими характеристиками в настоящее время получили преимущественное распространение [1].

Структура источника питания зависит от многих факторов, в том числе от мощности плазменной системы, режима работы, рода питающего тока, массогабаритных показателей. Их можно в свою очередь разделить на источники с дросселями насыщения, источники на управляемых приборах и параметрические источники.

В статье решается задача моделирования и исследования процессов в плазменных системах зажигания с источником питания, обладающим крутопадающей внешней характеристикой; особое внимание уделяется предельному режиму работы, при котором возможно нарушение устойчивого горения дуги в плазмотроне.

Электрическая принципиальная схема плазменной системы зажигания, основу которой составляет генератор стабилизированного тока, представлена на рис. 1.

Транзистор VT 1 работает в режиме широтно-импульсной модуляции, непрерывность тока через плазмотрон обеспечивается элементами L1 и VD 4, осциллятор предназначен для предварительного пробоя плазменной свечи и состоит из источника высоковольтных импульсов ИВИ и трансформатора T1.

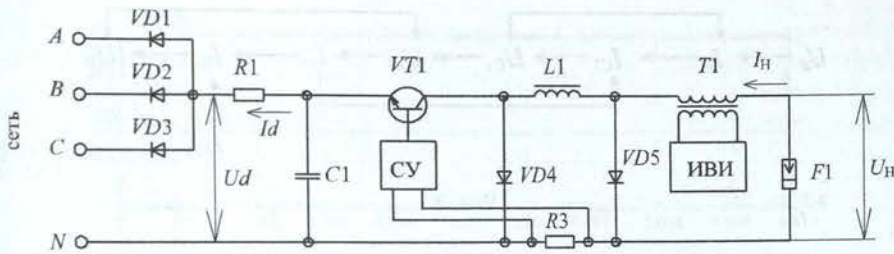


Рис. 1

Уравнения электромагнитных процессов в системе зажигания представлены в виде системы алгебро-дифференциальных уравнений (1) для двух рабочих состояний регулирующих элементов. В первом режиме транзистор находится в проводящем состоянии ($k = 1$). Во втором режиме транзистор находится в непроводящем состоянии ($k = 0$). Таким образом, с помощью коэффициента k , организовано управление работой регулирующего элемента.

$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{U_d - U_{C1}}{R1} \\ U_{C1} &= \frac{1}{C1} \int I_{C1} \cdot dt \\ I_{C1} &= I_d - I_{L1} \cdot k \\ I_{L1} &= \frac{1}{L1} \int U_{L1} \cdot dt \\ U_{L1} &= U_{C1} \cdot k - U_H \\ I_H &= I_{L1} + I_{T1} \\ U_H &= f(I_H) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

- где U_{C1} — напряжение на конденсаторе $C1$;
- I_{C1} — ток через конденсатор $C1$;
- I_d — ток через резистор $R1$;
- U_d — напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя;
- U_{L1} — напряжение на дросселе $L1$;
- k — коэффициент, показывающий состояние регулирующего элемента, $k = 0$ — непроводящее, $k = 1$ — проводящее;
- U_H — напряжение на плазматроне;
- I_H — ток через плазматрон;
- I_{T1} — ток пробоя воздушного промежутка плазматрона от импульса высокого напряжения осциллятора.

В системе уравнений (1) не учитывается падение напряжения на полупроводниковых элементах, трансформаторе $T1$ и резисторе $R3$. Также считается, что в начальный момент времени воздушный промежуток плазматрона уже пробит высоковольтным импульсом напряжения осциллятора.

Для системы уравнений (1) построена замкнутая система звеньев (рис. 2), процессы в звеньях которой описываются ее уравнениями (стрелками показана последовательность вычислений).

На рис. 3 приведена разработанная имитационная модель плазменной системы зажигания на основе библиотек Simulink и SimPowerSystems интегрированного пакета MATLAB [4].

Длительность и очередность работы элементов определяется только управляющими импульсами. Обозначение блока в каждом отдельном случае соответствует названию элемента в схеме, например, блок



обозначает представление значения емкости $C1$, а символ, отображенный внутри блока, указывает его величину.

Источник электропитания плазменной системы зажигания, обозначенный на схеме символом U_d , представлен блоком подсистемы (рис. 4), на выходе которой формируется напряжение, получаемое в результате однополупериодного выпрямления переменного трехфазного напряжения.

Блок Relational Operator на рис. 3 применяется для формирования и подачи управляющих импульсов «F» и управления работой регулирующего элемента схемы системы плазменного зажигания. На его выходе формируются импульсы «0» или «1», с длительностью, определяемой в результате сравнения величины тока через плазматрон с эталонной величиной, которая задается блоком Repeating Sequence. Частота управляющих импульсов «F» также задается в параметрах блока Repeating Sequence. Управляющие импульсы «F» в блоке Relational Operator имеют различную длительность при одинаковой частоте и таким образом открывают транзистор регулирующего элемента на различные по продолжительности интервалы времени, регулируя ток через плазматрон.

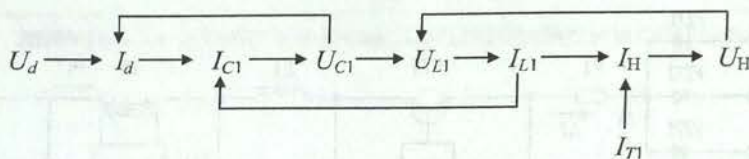


Рис. 2

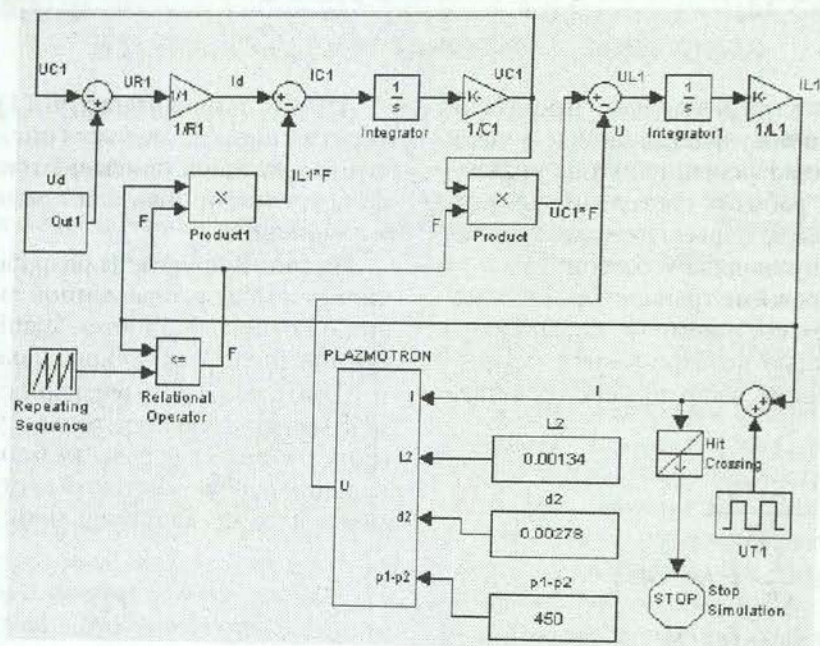


Рис. 3

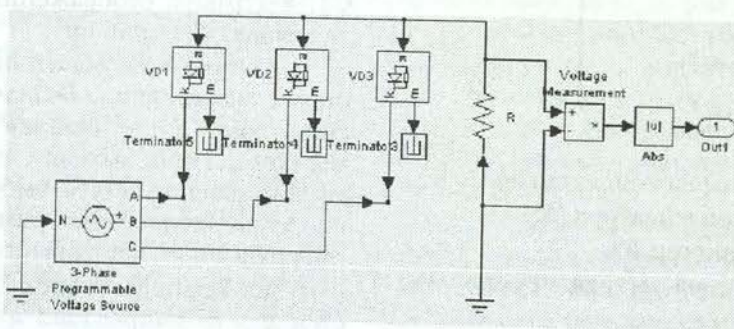


Рис. 4

Плазмотрон представлен блоком Plazmotron, на входной порт «I» которого подается сигнал, соответствующий току, протекающему через дугу, а с выходного порта «U» снимается сигнал, равный величине падения напряжения на дуге. В полях настройки данного блока вписывается математическое выражение, описывающее вольт-амперную характеристику фиксированной воздушной дуги [1, 5]

$$U_H = 305 \cdot \left(\frac{I_H^2}{G_{ВП} \cdot d_2} \right)^{-0,12} \cdot \left(\frac{G_{ВП}}{d_2} \right)^{0,08} \times \left(\frac{l_2}{d_2} \right)^{0,56} \cdot (pd_2)^{0,2}, \quad (2)$$

где U_H и I_H — напряжение и ток дуги плазмотрона; l_2 и d_2 — длина и диаметр дугового канала (L_2 и d_2 на рис. 3), м; p — давление в конце электродуговой камеры (p_1-p_2 на рис. 3), Па; $G_{ВП}$ — расход плазмообразующего воздуха, кг/с.

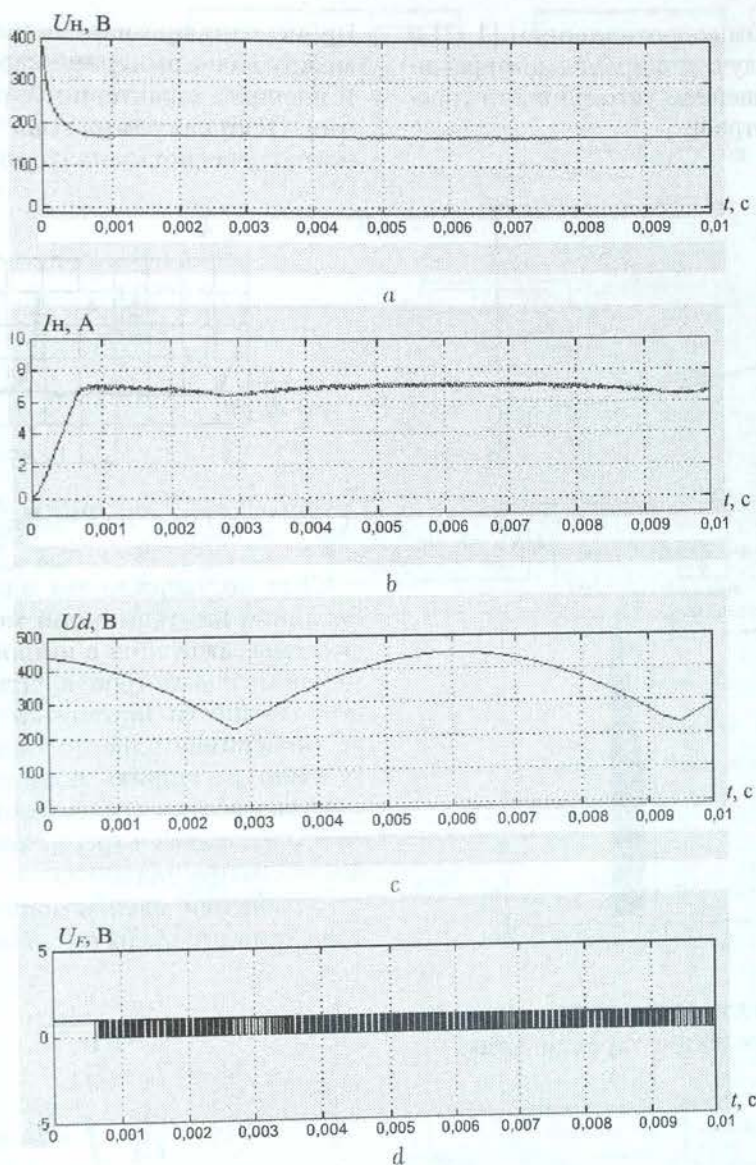


Рис. 5

В блоках $L2$, $d2$ и $p1-p2$ (рис. 3) задаются длина, диаметр и перепад давления в дуговой камере.

Блок Hit Crossing вырабатывает сигнал равный «1», когда ток через плазматрон упадет до нуля, используемый блоком Stop Simulation для останова процесса вычислений.

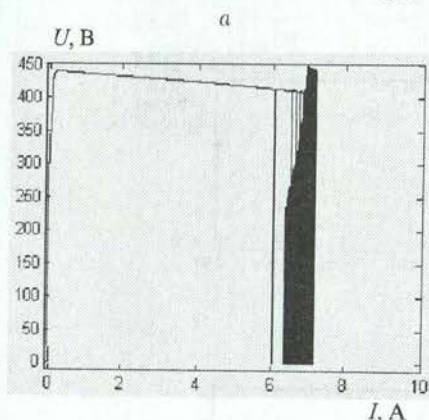
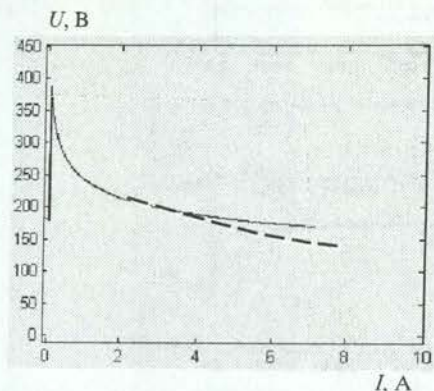
На рис. 5 приведены временные характеристики токов и напряжений на элементах схемы после момента ее включения: a — напряжение на плазматроне, b — ток через плазматрон, c — напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя, d — управляющие импульсы « F ».

На рис. 6 представлены реальная и полученная при моделировании вольт-амперные характеристики дуги плазматрона a и моде-

лированная область значений внешней характеристики источника b . Максимальное расхождение смоделированной вольт-амперной характеристики плазматрона и реальной составило 17%. Реальная вольт-амперная характеристика взята из [1]. Внешняя характеристика источника смоделирована по амплитудным значениям напряжения на выходе неуправляемого выпрямителя.

В разработанной имитационной модели плазменной системы зажигания в первом приближении учтены нелинейные свойства плазматронов. Для подтверждения адекватности результатов моделирования проведены экспериментальные исследования на стенде, схема которого показана на рис. 7 [6]. В основе стенда — схема плазменной системы зажи-

гания с балластным сопротивлением [1-3] и возможностью получения предельного режима работы с нарушением устойчивости горения дуги в плазмотроне.



--- - реальная характеристика
 --- - смоделированные характеристики

Рис. 6

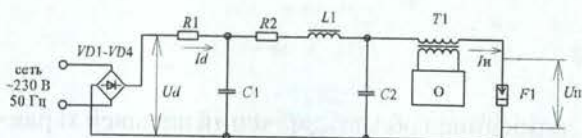


Рис. 7

Экспериментальные исследования проводились следующим образом: исследовалось влияние параметров схемы (напряжения питания, величин резисторов R_1 , R_2 и дросселя L_1) на устойчивость горения дуги в плазмотроне, при этом регистрировались ток и падение напряжения на дуге. Падение напряжения на дуге составляло в среднем 230 В, а ток изменялся в пределах от 2 до 10 А.

В ходе исследований выявлены предельные параметры источника питания, при выходе за которые нарушается устойчивость горения дуги и работа плазмотрона возможна только при включении осциллятора. Это

происходит при нарушении согласованности между вольт-амперной характеристикой дуги и внешней характеристикой источника питания. Осциллограмма тока через дугу для данного случая показана на рис. 8.

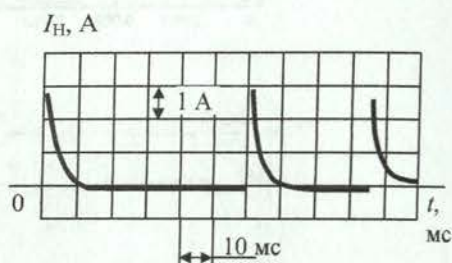


Рис. 8

Для подтверждения адекватности разработанной имитационной модели плазменной системы зажигания в широком диапазоне изменения параметров в условиях ограниченной мощности источника питания в составе экспериментального стенда, было решено условно расширить возможности стенда за счет разработки его имитационной модели и ее исследования в требуемом диапазоне мощностей источника питания.

Уравнения электромагнитных процессов для схемы стенда на рис. 7 записаны в виде

$$\begin{aligned}
 I_d &= \frac{U_d - U_{C1}}{R_1}, \\
 I_{C1} &= I_d - I_{L1} \\
 U_{C1} &= \frac{1}{C_1} \cdot \int I_{C1} \cdot dt, \\
 U_{L1} &= U_{C1} - I_{L1} \cdot R_2 - U_{C2}, \\
 I_{L1} &= \frac{1}{L_1} \cdot \int U_{L1} \cdot dt, \\
 U_{C2} &= U_{T1} + U_H, \\
 I_{C2} &= C_2 \cdot \frac{dU_{C2}}{dt}, \\
 I_H &= I_{L1} + I_{C2} \\
 U_H &= f(I_H), \\
 U_{T1} &= L_{T1} \cdot \frac{dI_H}{dt}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

В системе уравнений (3) считается, что в момент включения схемы воздушный промежуток плазмотрона уже пробит высоковольтным импульсом напряжения. Принято, что зависимость напряжения дуги плазмотрона от электрического тока и расхода плазмообразующего воздуха U_H описывается уравнением (2).

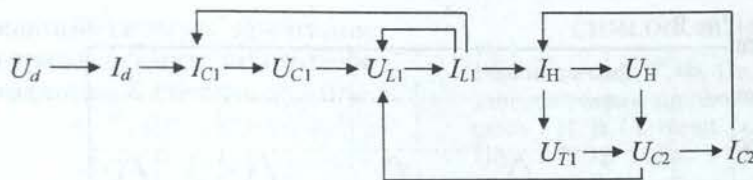


Рис. 9

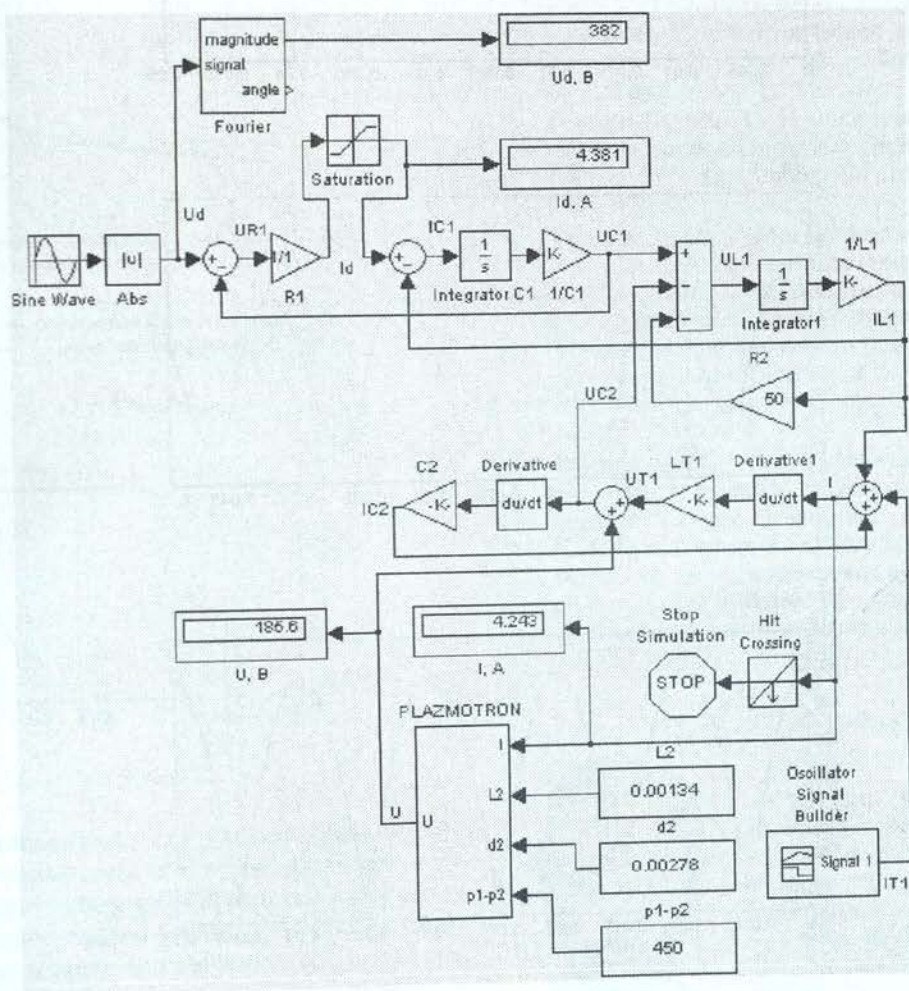


Рис. 10

Для системы уравнений (3) построена замкнутая система звеньев (рис. 9) и создана имитационная модель стенда (рис. 10).

Численные результаты моделирования показаны на рис. 11: *a* — напряжение на плазмотроне, *b* — ток через плазмотрон, *c* — напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя. По полученным результатам моделирования видно, что ток через дугу носит пульсирующий характер, то есть во время горения дуга может погаснуть при отсутствии осциллятора.

На рис. 12 представлена реальная и полученная при моделировании вольт-ампер-

ная характеристика дуги плазмотрона. Максимальное расхождение смоделированной вольт-амперной характеристики плазмотрона и реальной составило 9%. Реальная вольт-амперная характеристика взята из [1].

На рис. 13 показана форма смоделированного тока через дугу, когда источник питания имеет предельно низкую мощность, при которой нарушается устойчивость горения дуги. Качественно и количественно кривая тока через дугу (рис. 13) хорошо согласуется с полученной экспериментально кривой тока, показанной на рис. 8. Расхождение составляет не более 10%.

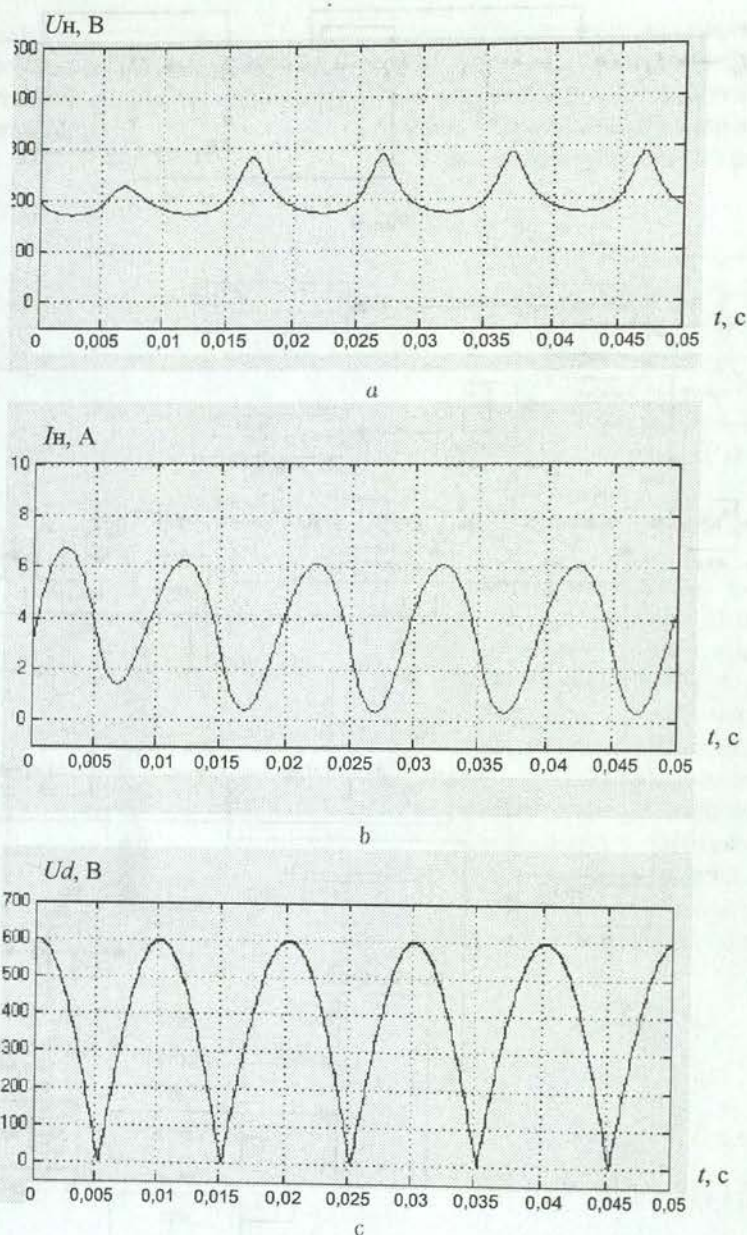


Рис. 11

Результаты исследований показывают, что напряжение, питающее плазматрон, носит пульсирующий характер и это может влиять на устойчивость горения дуги. Для сглаживания пульсаций и поддержания непрерывности тока в дуге возможно увеличение емкости конденсатора фильтра $C1$, но при этом значительно увеличиваются габариты конденсатора. Непрерывность тока в дуге может быть обеспечена выбором оптимальной величины индуктивности дросселя $L1$. Для того чтобы ток дуги не прерывался, необходимо увеличить индуктивность дросселя $L1$ до величины, равной $100 \div 200$ мГн, емкость конденсатора $C1$ при этом составляет 10 мкФ. Дальней-

шее увеличение индуктивности дросселя $L1$ нецелесообразно: это может привести к инерционности схемы и нерозжигу дуги.

Эти результаты полностью согласуются с результатами экспериментальных исследований в условиях разработанного стенда.

Таким образом, разработанная модель стенда позволила провести анализ устойчивости работы схемы и произвести подбор параметров элементов. По полученным результатам исследований можно сделать вывод, что имитационная модель стенда адекватно отражает процессы, происходящие в схеме. Основываясь на этом утверждении, сделано заключение, что разработанная имитацион-

ная модель плазменной системы зажигания так же адекватно отражает электромагнитные процессы, происходящие в системе зажигания.

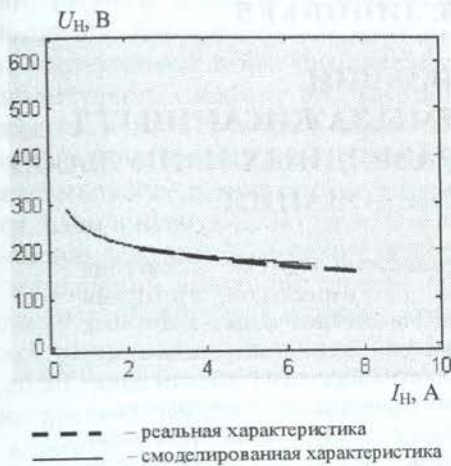


Рис. 12

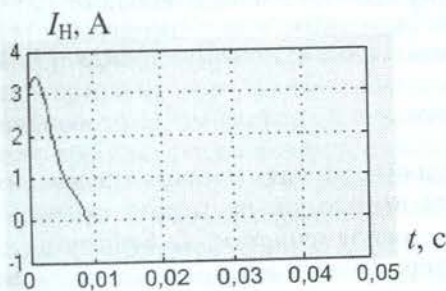


Рис. 13

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что повторяемость рассчитанной вольт-амперной характеристики в одном и том же плазмотроне при одинаковых внешних условиях осуществляется с отклонениями $\pm 10\%$ [2]. Это объясняется чувствительностью дуги к различным факторам, таким как состояние поверхности электродов, качество сборки плазмотрона, пульсации напряжения источника питания и т. д.

Таким образом, разработанная имитационная модель плазменной системы зажигания адекватно отражает реальные электромагнитные процессы, модель может быть использована для исследования закономерностей дуговых процессов в системах зажигания и для решения задач оптимизации параметров по реальным критериям эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский, Г. Ф. Плазменные системы газоперекачивающих агрегатов / Г. Ф. Романовский, И. Б. Матвеев, С. И. Сербин. СПб.: Недра, 1992. 142 с.
2. Даутов, Г. Ю. Плазмтроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. Киев: Наук. Думка, 1984. 166 с.
3. Ясько, О. И. Электрическая дуга в плазмтроне / О. И. Ясько. М.: Наука и техника, 1977. 156 с.
4. Герман-Галкин, С. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Герман-Галкин. М.: Корона принт, 2001. 320 с.
5. Худяев, В. Н. Моделирование параметров плазменных воспламенителей ГТД / В. Н. Худяев // Актуальные проблемы электроэнергетики: XXIV науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. проф., д-ров техн. наук А. М. Бамдаса и Ю. Л. Мукосеева. Н.-Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2005. 260 с.
6. Худяев, В. Н. Экспериментальный стенд для исследования характеристик плазменных систем зажигания / В. Н. Худяев, С. А. Тухватуллин, С. В. Поляков // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Посвящается 75-летию Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2006. С. 189–191.

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.



Худяев Вячеслав Николаевич, асп. той же каф. Дипл. инж. по электрооборуд. ЛА и наземн. тр-та (УГАТУ, 2001). Работает над дис. в обл. моделир. электромагн. процессов в системах плазменного зажигания.