

ЭНЕРГЕТИКА • ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.452.3

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН, З. Г. ВАЛИУЛЛИНА

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЕМКОСТНОЙ СИСТЕМЕ ЗАЖИГАНИЯ
С ОДНОПОЛЯРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Анализируются разрядные процессы в перспективной емкостной системе зажигания аperiodического разряда. На основе полученных выражений для параметров разрядов разработана имитационная модель системы зажигания с учетом нелинейных свойств полупроводниковой свечи зажигания. Аналитически получено выражение для расчета энергии искровых разрядов. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями разрядных процессов в системе зажигания аperiodического разряда в широком диапазоне изменения параметров, определяющих энергетическую эффективность систем зажигания. *Емкостные системы зажигания ; аperiodический разряд ; моделирование ; энергия искровых разрядов ; экспериментальные исследования*

Системы зажигания с однополярным разрядным импульсом относятся к перспективным для современных ГТД с различными условиями воспламенения смеси, поскольку обладают повышенной энергетической эффективностью и воспламеняющей способностью [1]. Принципиальная схема разрядной цепи такой системы зажигания показана на рис. 1. Разрядная цепь содержит два нелинейных элемента: коммутирующий искровой разрядник FV и полупроводниковую свечу F , необходимость аналитического описания нелинейностей которых усложняет моделирование. В [2] разработана модель емкостной системы зажигания с однополярным импульсом при допущении о линейности полупроводниковой свечи. В этом случае кривая $i(t)$, полученная в результате моделирования, близка к реальной, расхождение не превышает 5 %. Кривая падения напряжения на свече в качественном плане не соответствует экспериментальной, приведенной в [1], результаты моделирования не могут быть использованы для разработки методик проектирования и оценки эффективности систем зажигания с однополярным импульсом.

В статье решается задача моделирования разрядных процессов в системе зажигания с однополярным импульсом с учетом нелинейности полупроводниковой свечи на основе аппроксимации реальных кривых падения напряжения в свече и тока аналитическими зависимостями.

Нелинейность коммутирующего разрядника не учитывается, так как в таких схемах разрядник участвует в работе в течение незначительной части разрядного процесса.

Однополярный (аperiodический) разряд состоит из двух этапов. Первый этап характеризует процесс разряда накопительного конденсатора на цепь, состоящую из разрядника, свечи и катушки индуктивности, в течение второго этапа, существенно более длительного, разрядный ток замыкается в цепи, состоящей из катушки индуктивности, вентили и свечи.

Осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе, разрядного тока и падения напряжения на свече, характерные для емкостной системы зажигания с однополярным импульсом, представлены на рис. 2, где U_n – напряжение на накопительном конденсаторе к началу искровой стадии разряда в полупроводниковой свече [1].

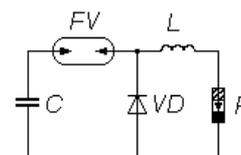


Рис. 1. Принципиальная схема разрядной цепи системы зажигания с однополярным импульсом

Схемы замещения для первого и второго этапов разрядного процесса показаны на рис. 3, а, б соответственно, где R_1 – эквивалентное ак-

тивное сопротивление разрядной цепи для первого этапа разрядного процесса, R_2 – эквивалентное активное сопротивление разрядной цепи для второго этапа разрядного процесса.

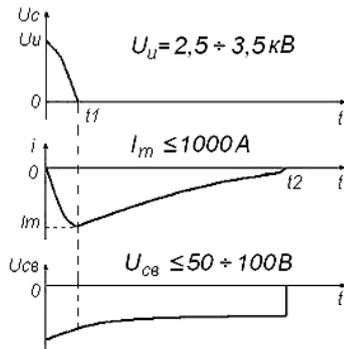


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе, разрядного тока и падения напряжения на свече

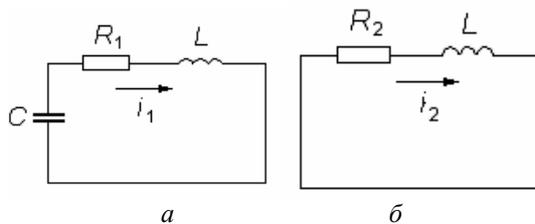


Рис. 3. Схемы замещения для этапов разрядного процесса: *a* – первый этап; *б* – второй этап

Учет нелинейности полупроводниковой свечи возможен двумя способами. Первый заключается в описании реальных динамических вольтамперных характеристик свечи с последующим переходом к временным зависимостям через закон изменения тока. Этот способ осложняется неоднозначностью вольтамперных характеристик при изменении параметров разрядной цепи, а также отсутствием этой информации для серийных полупроводниковых свечей. Второй способ учета нелинейности свечи состоит в аналитическом описании усредненных кривых падения напряжения на свече, полученных экспериментально.

Разрядный ток, протекающий через полупроводниковую свечу, как показано в работе [1], практически не зависит от изменения сопротивления разряда, так как сопротивление пробитой свечи существенно ниже эквивалентного активного сопротивления разрядной цепи.

Таким образом, на первом этапе моделирования примем, что разрядный ток и напряжение на накопительном конденсаторе меняются по

закону, справедливому при разряде конденсатора на линейную цепь $R-L$, а в последующем нелинейность свечи будем учитывать с использованием экспериментальных данных.

Примем следующие допущения:

- 1) разрядник и вентиль – идеальные ключи;
- 2) длительность подготовительной стадии разряда в полупроводниковой свече равна нулю.

Дифференциальные уравнения для первого и второго этапов переходного процесса запишутся так:

$$i_1(t)R_1 + L \frac{di_1}{dt} + U_C(t) = 0; \quad (1)$$

$$i_2(t)R_2 + L \frac{di_2}{dt} = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) относительно тока имеет вид:

$$i_1(t) = I_m e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где

$$\delta = \frac{R_1}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3')$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad I_m = -\frac{U_u}{\omega L}, \quad \varphi = 0.$$

Тогда для разрядного тока окончательно запишем:

$$i_1(t) = -\frac{U_u}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t). \quad (4)$$

Напряжение на накопительном конденсаторе:

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) dt + U_u. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) таково:

$$U_C = -\frac{U_u \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \arctg \frac{\omega}{\delta}). \quad (6)$$

На основе принятых выше допущений будем учитывать нелинейность полупроводниковой свечи путем аппроксимации реальных кривых падения напряжения на свече.

Поскольку в течение первого этапа разрядного процесса до момента t_1 на рис. 2, когда вентиль не участвует в работе, кривая падения напряжения на свече должна соответствовать классическому колебательному разряду (рис. 4), аппроксимирующее выражение представим в виде:

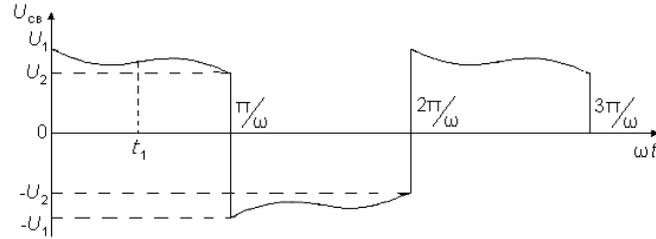


Рис. 4. Кривая падения напряжения на свече при колебательном разряде

$$U_{св1} = U_1 - At - U' \sin 2\omega t, \quad (7)$$

где U_1 – начальное напряжение на свече; $A = \frac{U_1 - U_2}{\pi/\omega}$; U_2 – напряжение на свече в конце полупериода разрядного процесса; U' – коэффициент, определяемый из экспериментальной кривой падения напряжения в свече, $U' = 1 \div 5$ В. Переход первого этапа разряда во второй происходит в момент времени t_1 на рис. 2 и 4, когда напряжение на накопительном конденсаторе достигает нуля. В уравнении (2) для второго этапа переходного процесса обозначим:

$$\alpha = \frac{R_2}{L}. \quad (8)$$

С учетом (8) уравнение (2) запишется так:

$$\frac{di_2}{dt} + \alpha i_2(t) = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9):

$$i_2(t) = Be^{-\alpha t}, \quad (10)$$

где B – постоянная интегрирования.

Для нахождения постоянной интегрирования подставим $t = t_1$ в выражения (10) и (4) и решим получившуюся систему уравнений. В итоге будем иметь:

$$B = -\frac{U_n}{\omega L} e^{-(\delta-\alpha)t_1} \sin(\omega t_1). \quad (11)$$

Таким образом, для разрядного тока второго этапа справедливо:

$$i_2(t) = -\frac{U_n}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t_1) e^{-\alpha(t-t_1)}. \quad (12)$$

Напряжение на катушке индуктивности в течение второго этапа переходного процесса с учетом (12):

$$U_L = L \frac{di_2}{dt} = \frac{U_n \alpha}{\omega} e^{-(\delta-\alpha)t_1} \sin(\omega t_1) e^{-\alpha t}. \quad (13)$$

Падение напряжения на свече в течение второго этапа разрядного процесса определим следующим образом: его значение примем постоянным и равным значению падения напряжения на свече в момент времени t_1 , когда напряжение на конденсаторе равно нулю. Подставив в (7) $t_1 = \frac{\pi}{2\omega}$, получим:

$$U_{св} = \frac{U_1 + U_2}{2}. \quad (14)$$

Применительно к уравнениям (1-14) разработана имитационная модель емкостной системы зажигания с однополярным импульсом в среде MATLAB 6.5 (рис. 5), позволяющая без проведения физического моделирования получить не только количественные, но и качественные характеристики разрядных процессов.

На рис. 6 представлено описание подсистем имитационной модели для параметров i_1 , i_2 , U_c , $U_{св1}$, $U_{св2}$. В качественном плане полученные с использованием имитационной модели зависимости $U_c(t)$, $i(t)$, $U_{св}(t)$ близки к реальным экспериментальным: разрядный ток и падение напряжения в свече в течение искровой стадии разряда совпадают по фазе, гашение разряда в свече происходит при достижении минимального значения напряжения на катушке индуктивности, определяемого известным условием гашения дуги переменного тока. Для подтверждения адекватности разработанной имитационной модели проведены экспериментальные исследования в широком диапазоне изменения параметров разрядной цепи ($L = 5; 15; 20$ мкГн; $C = 0,25; 0,5; 1; 2$ мкФ). Схема экспериментального стенда представлена на рис. 7. Исследования проводились осциллографическим методом. Характерные осциллограммы тока и падения напряжения на свече (рис. 8), полученные при моделировании, сравнены с экспериментальными (рис. 9) для частного случая при параметрах разрядной цепи, равных: $L = 5$ мкГн, $C = 1$ мкФ, $U_0 = 2300$ В, $R_1 = 1,8$ Ом, $R_2 = 0,5$ Ом. Расхождение не превышает 20 %.

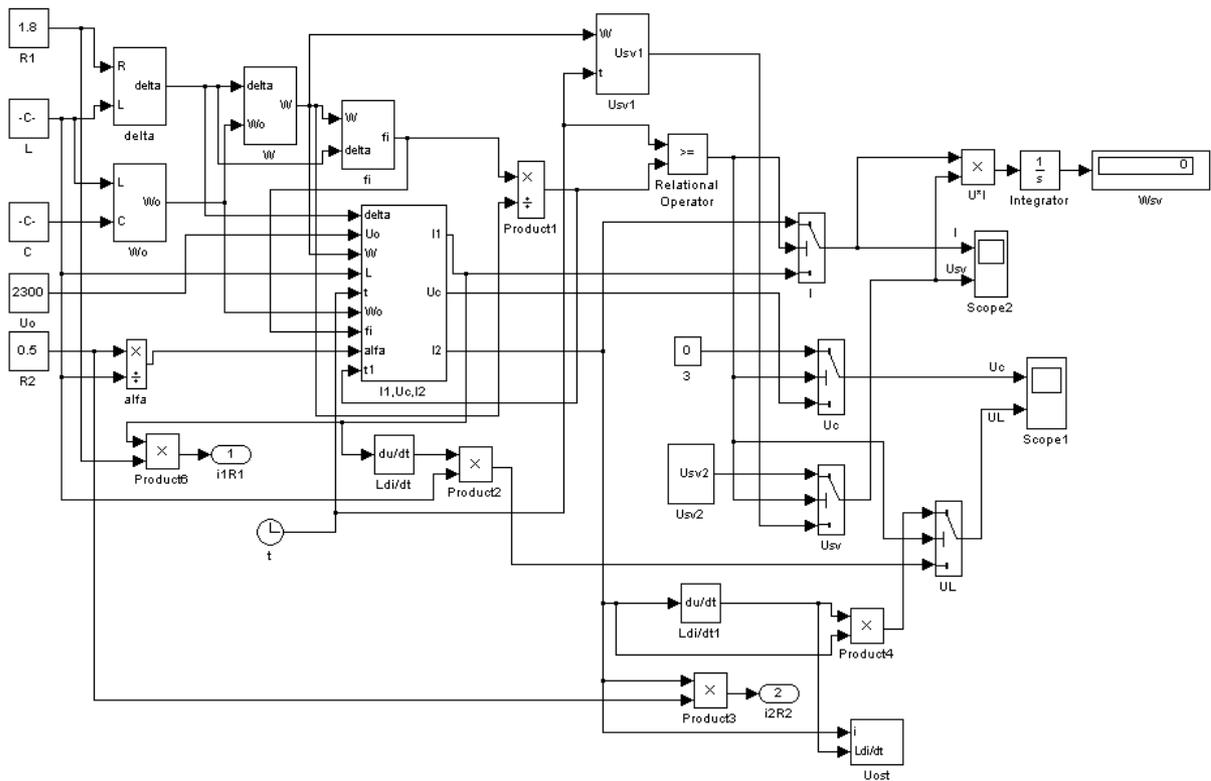


Рис. 5. Имитационная модель емкостной системы зажигания аperiodического разряда

На рис. 10 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований энергетической эффективности емкостной системы зажигания с однополярным импульсом в виде графиков зависимостей энергии разряда в свече, амплитуды разрядного тока и длительности искровой стадии разряда в функции параметров разрядной цепи L и C . Амплитуда разрядного тока и длительность искровой стадии разряда были определены по формулам (3') и (18) соответственно. Энергия разрядов в свече определялась по методу перемножения мгновенных значений токов и напряжений по осциллограммам с последующим графическим интегрированием построенной кривой мгновенной мощности. Теоретические кривые получены на основе исследования разработанной имитационной модели и вывода расчетного выражения для энергии искровых разрядов по соотношению:

$$W_{CB} = \int_0^{t_n} U_{CB}(i)i(t)dt. \quad (15)$$

Подставляя (4), (7), (12) и (14) в выражение (15), после преобразований получим:

$$W_{CB} = \int_0^{\pi/2\omega} [(U_1 - At - U' \sin 2\omega t) \times \frac{U_n}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t)] dt + \int_{\pi/2\omega}^{t_n} [\frac{U_1 + U_2}{2} \frac{U_n}{\omega L} e^{-\delta t_1} \sin(\omega t_1) e^{-\alpha(t-t_1)}] dt, \quad (16)$$

где t_n определяется из выражения для минимального напряжения на индуктивности U_{Lmin} на основании (13) и с учетом того, что $\omega t_1 \approx \frac{\pi}{2}$:

$$U_{Lmin} = \frac{U_n \alpha}{\omega} e^{-(\delta-\alpha)t_1} e^{-\alpha t_n}, \quad (17)$$

тогда

$$t_n = \left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) t_1 \ln \frac{U_n \alpha}{U_{Lmin} \omega}. \quad (18)$$

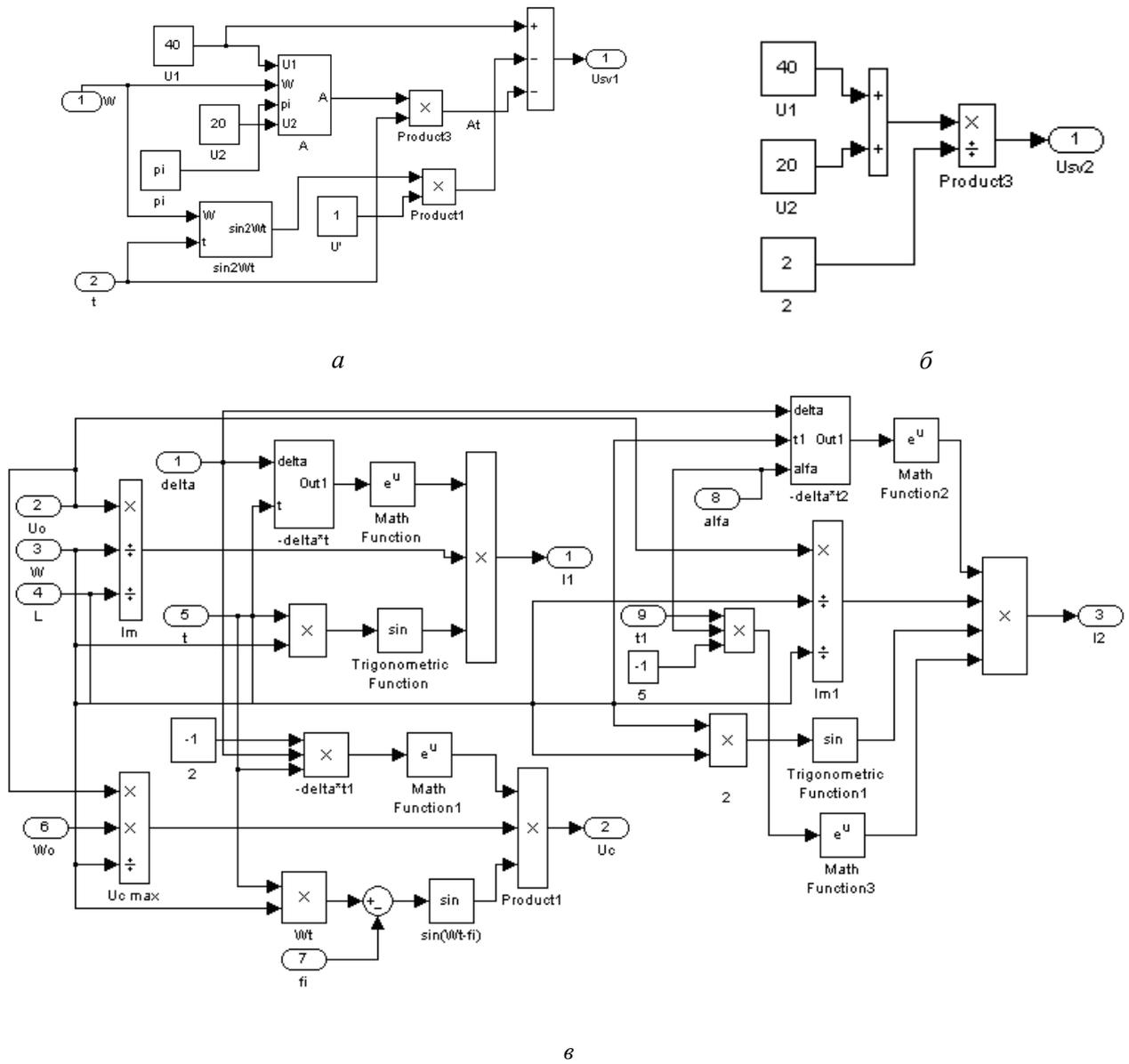


Рис. 6. Подсистемы имитационной модели емкостной системы зажигания аperiodического разряда для параметров: а – $U_{св1}$, б – $U_{св2}$, в – i_1, i_2, U_c

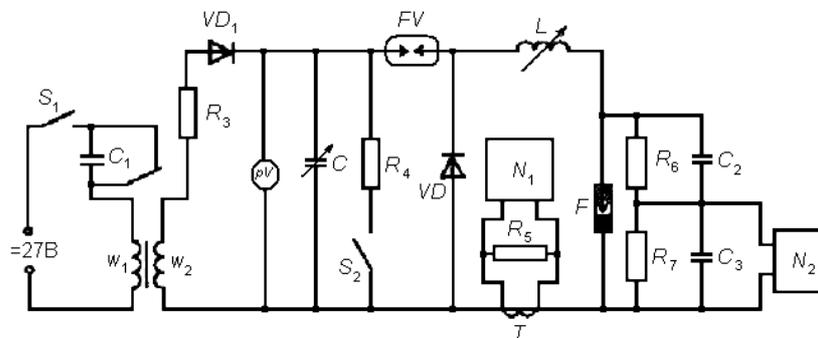


Рис. 7. Схема испытательного стенда

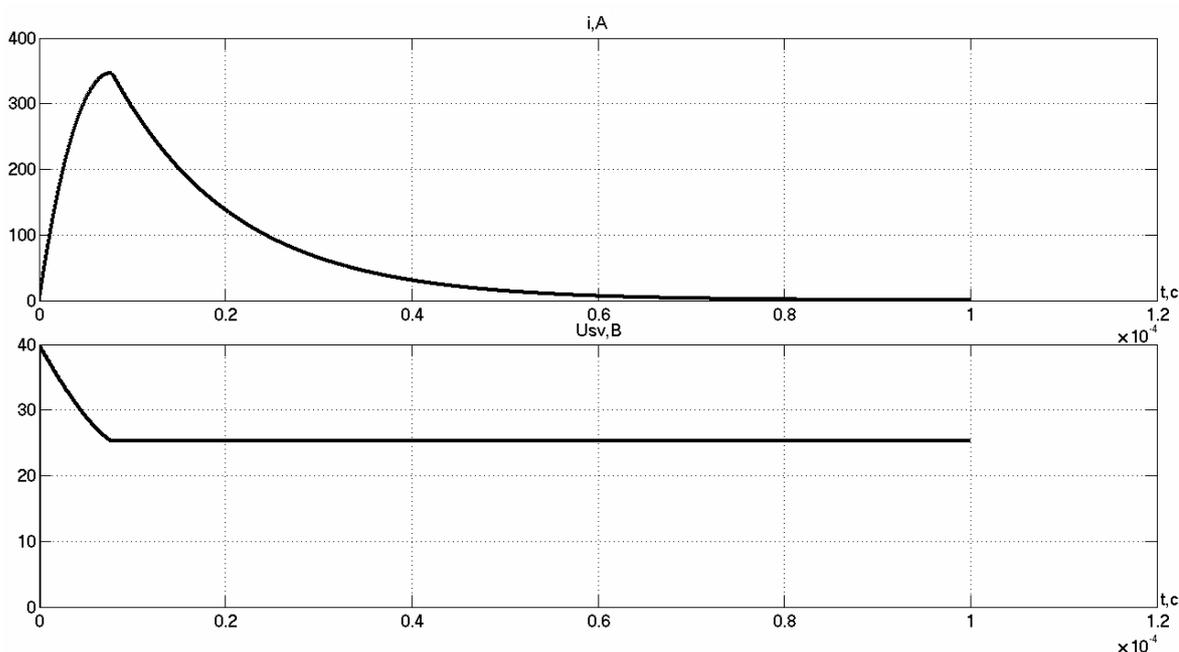


Рис. 8. Результаты моделирования

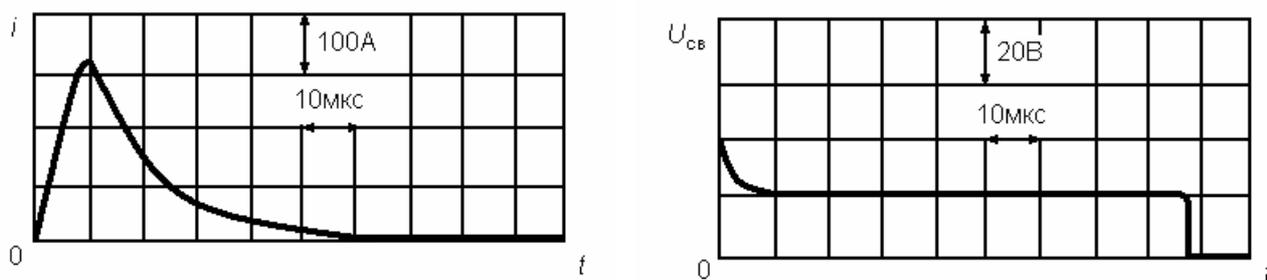


Рис.9. Осциллограммы, полученные экспериментально

С учетом (18) и на основании упрощений окончательное решение (16) примет вид:

$$W_{св} = \frac{U_{и} e^{-\frac{\pi\delta}{2\omega}}}{2} \left(\begin{array}{l} \frac{\pi}{\omega} (e^{H_1} - 1) - \\ - \frac{1}{\pi(\delta^2 + \omega^2)} \times \\ \times \left(\frac{4U' \pi \omega H_2}{\delta^2 + 9\omega^2} + \frac{H_3 - H_4}{\delta^2 + \omega^2} \right) \end{array} \right), \quad (19)$$

$$H_3 = U_1 \left(\begin{array}{l} \left(-2\delta\omega + \pi(\delta^2 + \omega^2) \right) \times \\ \times \left(2e^{\frac{\pi\delta}{2\omega}} \omega - \delta \right) - 2\omega^3 \end{array} \right),$$

$$H_4 = U_2 \left(\begin{array}{l} \pi\delta(\delta^2 + \omega^2) - \\ - 2\omega \left(-\delta^2 + 2e^{\frac{\pi\delta}{2\omega}} \delta\omega + \omega^2 \right) \end{array} \right).$$

где

$$H_1 = \alpha \left(1 - 2 \frac{\omega}{\pi} \left(1 - \frac{\delta}{\alpha} \right) t_1 \ln \left(\frac{U_{и} \alpha}{U_{L_{\min}} \omega} \right) \right),$$

$$H_2 = \delta^2 + 2e^{\frac{\pi\delta}{2\omega}} \delta\omega + 3\omega^2,$$

Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 9, а, при увеличении индуктивности происходит увеличение энергии разрядов в свече, несмотря на возрастание активного сопротивления разрядной цепи при включении катушки индуктивности. Данный результат правомерен и может быть объяснен на основе вида вольт-амперной характеристики искрового разряда. Увеличение индуктивности приводит к снижению разрядного тока, в соответствии с

видом вольт-амперной характеристики искрового разряда растет активное сопротивление разряда, при этом накопленная энергия перераспределяется, большая часть энергии выделяется в нелинейном элементе.

Таким образом, допущения при описании нелинейных свойств полупроводниковой свечи, принятые в ходе разработки компьютерной мо-

дели, являются обоснованными. Модель реально отображает процессы в разрядной цепи и может быть рекомендована к использованию для предварительной оценки, прогнозирования энергетической эффективности емкостных систем зажигания с однополярным импульсом на стадии их разработки и проектирования.

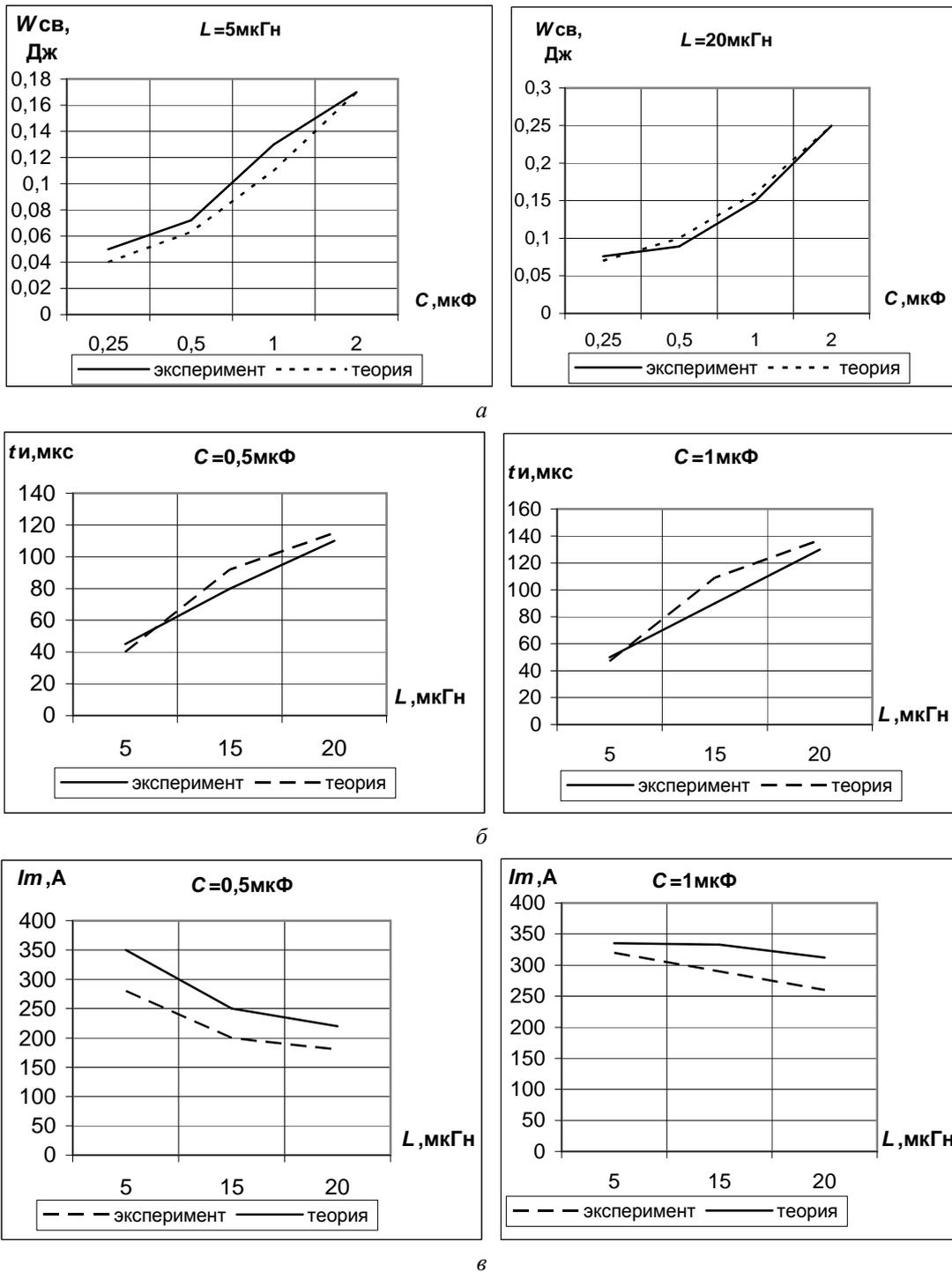


Рис. 10. Результаты исследований:

а – зависимости $W_{св} = f(C, L)$; б – зависимости $t_{н} = f(L, C)$; в – зависимости $I_m = f(L, C)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гизатуллин, Ф. А.** Емкостные системы зажигания / Ф. А. Гизатуллин. Уфа : УГАТУ, 2002. 249 с.

2. **Гизатуллин, Ф. А.** Имитационная модель разрядной цепи системы зажигания с однополярным импульсом / Ф. А. Гизатуллин, З. Г. Валиуллина // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий : сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ, 2007. С. 111–114.

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 зажигания двигателей ЛА.



Валиуллина Зульфия Газинуровна, асп. той же каф. Дипл. инж. по электрооборудованию ЛА (УГАТУ, 2005). Работает над дис. по проблеме иссл. и моделир. разрядн. процессов в перспективн. емкостн. системах зажигания с однополярным импульсом.