

УДК 621.43.044:629

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА В ЕМКОСТНОЙ СИСТЕМЕ ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ МОТОТЕХНИКИ

Ф. Р. Исмагилов¹, Р. Н. Султангалеев², Е. А. Полихач³,
И. И. Ямалов⁴, Д. Р. Фаррахов⁵

¹ismagilovfr@mail.ru, ²rn2004@mail.ru, ³polihach@yandex.ru, ⁴outlegal@mail.ru, ⁵d.farrakhov@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.12.2013

Аннотация. В рамках разработки конденсаторной системы зажигания для мототехники исследована схема замещения силовой части коммутатора. Проанализированы кривые изменения напряжения в первичной и вторичной обмотках катушки зажигания в переходном режиме. Полученные результаты были использованы при проектировании и оптимизации системы зажигания.

Ключевые слова: емкостная система зажигания; математическая модель; переходный процесс; схема замещения; CDI.

На кафедре электромеханики УГАТУ совместно с ОАО «УАПО» разработана микропроцессорная система зажигания (МПСЗ) для автономных объектов (снегоходы, водные мотоциклы, моторные лодки и т. п.), в которой углом опережения зажигания управляет микропроцессорный элемент, а устойчивое искрообразование достигается при низкой частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания [1].

На этапе проектирования для детального анализа было необходимо провести математическое моделирование переходных процессов заряда и разряда конденсатора, а также создать математическую модель, включающую в себя конденсатор, катушку зажигания, свечу зажигания и силовые ключи [2]. На рис. 1–3 показаны схемы замещения силовой части системы зажигания, которые были использованы для анализа переходных процессов. Катушка зажигания может быть смоделирована как повышающий трансформатор, а свеча зажигания – как нагрузка, которая включается при достаточно большом напряжении и остается включенной до тех пор, пока напряжение через воздушный промежуток не станет равным нулю. На рис. 1 показана схема замещения цепи с катушкой зажигания. Резистор r'_{arc} – сопротивление дуги, приведенное к первичной обмотке [3].

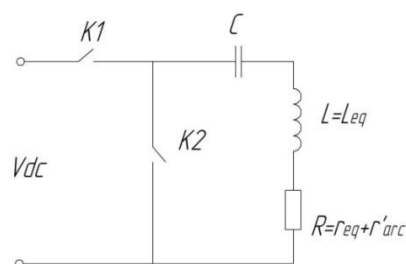


Рис. 1. Схема замещения цепи с катушкой зажигания

На рис. 2 показана схема замещения, когда конденсатор заряжается с $V_c = 0$ до $V_c = V_{dc}$ (ключ $K1$ замкнут). В случае разряда конденсатора от $V_c = V_{dc}$ до $V_c = 0$ замкнут ключ $K2$ (рис. 3).

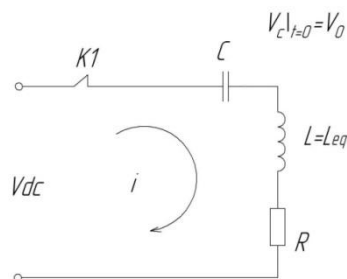


Рис. 2. Схема замещения при заряде конденсатора

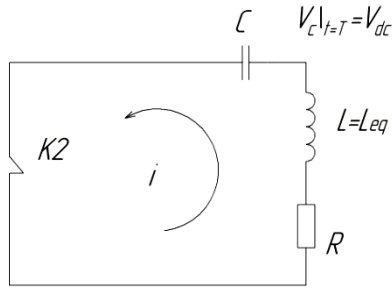


Рис. 3. Схема замещения при разряде конденсатора

На основании электрической принципиальной схемы и соответствующих схем замещения (рис. 1–3) сформирована система дифференциальных уравнений, описывающая переходные процессы в системе зажигания:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = V_{dc} ;$$

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = 0 .$$

Дифференцируем второе уравнение и делим на L :

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \left(\frac{R}{L}\right) \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0.$$

Решением этого уравнения является выражение вида:

$$I = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

Подставляя это решение, получаем:

$$\begin{cases} A_1 e^{s_1 t} \left(s_1^2 + \frac{R s_1}{L} + \frac{1}{LC} \right) + A_2 e^{s_2 t} \left(s_2^2 + \frac{R s_2}{L} + \frac{1}{LC} \right) = 0; \\ S_1 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = \alpha + \beta; \\ S_2 = \frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = \alpha - \beta; \end{cases}$$

где $\alpha = \frac{R}{2L}$, $\beta = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$ и $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Когда $\alpha < \omega_0$, система недодемпфирована и находится в стадии медленно затухающего колебательного процесса, S_1 и S_2 комплексно сопряжены, т. е.:

$$S_1 = \alpha + j\beta,$$

$$S_2 = \alpha - j\beta,$$

$$\beta = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2},$$

или

$$i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 e^{j\beta t} + A_2 e^{-j\beta t}) = e^{-\alpha t} (A_3 \cos \beta t + A_4 \sin \beta t)$$

для схемы разряда (рис. 2), где A_1, A_2, A_3, A_4 – константы. Более того, $I(0+) = 0$ и $V_c(0+) = V_{dc}$, это означает, что $A_3 = 0$. Кроме того,

$$L \frac{di}{dt} = V_c(0+),$$

$$A_4 = \pm \frac{Vd}{\beta L},$$

$$i = \pm \frac{Vd}{\beta L} e^{-\alpha t} \sin \beta t .$$

Общее выражение для нескольких циклов разряда и заряда:

$$i = \pm \frac{Vd}{\beta L} e^{-\alpha t(t-nT)} \sin \beta(t-nT),$$

где T – длительность открытого состояния ключа $K1$ или $K2$.

Для схемы на рис. 2 справедливо условие $T > t > 0$, а для схемы на рис. 3 – $T < t < 2T$. Предыдущее уравнение было использовано для определения времени открытия каждого ключа для получения желаемой формы тока. Так как после заряда или разряда накопленная энергия в катушке зажигания равна нулю, то энергетическое уравнение будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C V_{dc}^2 &= \int_{nT}^{(n+1)T} i^2 (R_{eq} + R'_{arc}) dt = \\ &= \int_{nT}^{(n+1)T} i^2 R_{eq} dt + \int_{nT}^{(n+1)T} i^2 R'_{arc} dt. \end{aligned}$$

Первый член уравнения показывает потери в системе, второй – энергию, накопленную в воздушном зазоре. Параметры системы были спроектированы с учетом минимизации потерь с сохранением максимальной энергии, накопленной в зазоре.

В программном пакете LTSpice v4.19 в результате анализа переходных процессов схем замещения в соответствии с полученными параметрами системы была разработана модель, представленная на рис. 4.

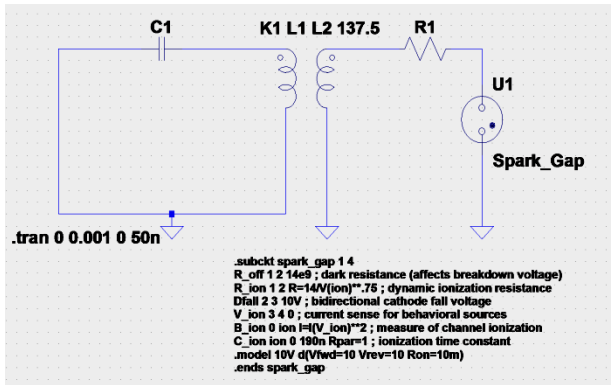


Рис. 4. Модель системы зажигания

В результате моделирования схемы получены графики изменения тока и напряжения разряда конденсатора в переходных режимах. Характерные кривые изменения напряжения в первичной и вторичной обмотках катушки зажигания в переходном режиме представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

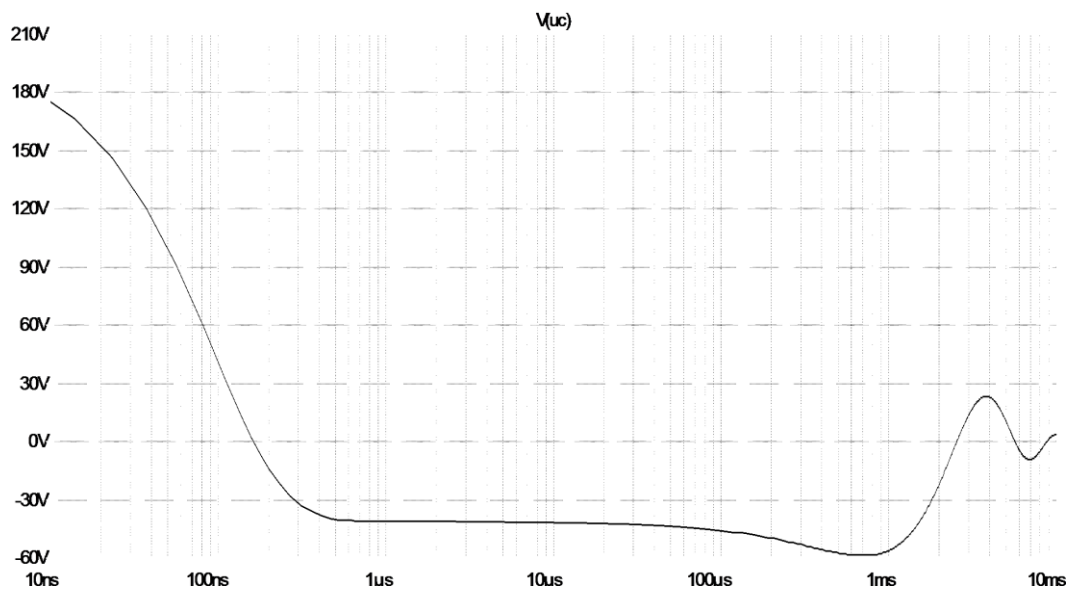


Рис. 5. Переходный процесс напряжения в первичной обмотке катушки зажигания

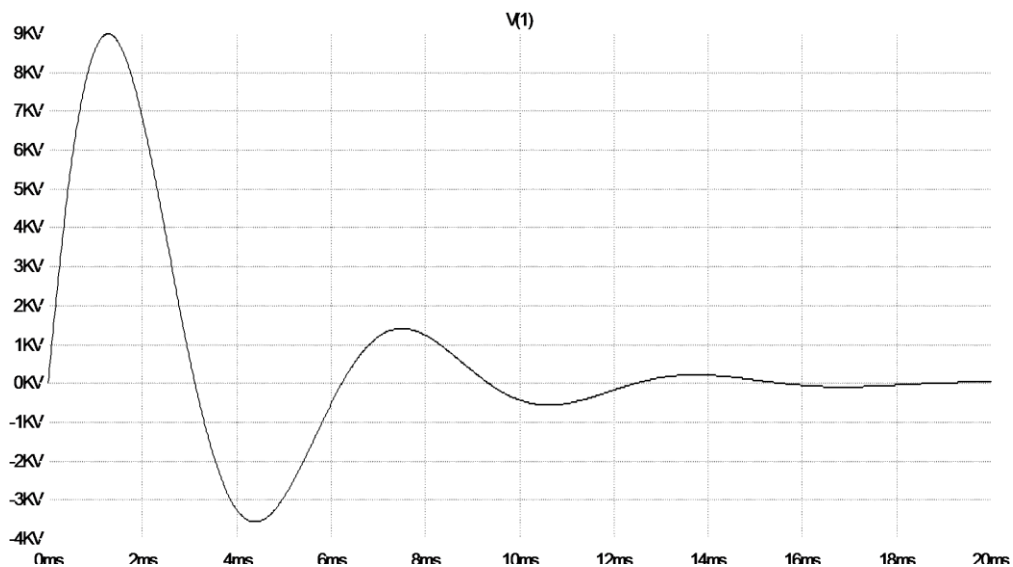


Рис. 6. Переходный процесс напряжения во вторичной обмотке катушки зажигания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ графиков показал, что амплитуда и форма напряжения, а также длительность переходных процессов согласуются с данными, полученными на макетном образце, что доказывает справедливость результатов моделирования. Полученные результаты были использованы при инженерных расчетах, моделировании характеристик, оптимизации системы зажигания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полихач Е. А.** Магнитоэлектрический генератор электротехнических комплексов малых транспортных средств: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.09.03) / Полихач Евгений Александрович; ГОУ ВПО УГАТУ. Уфа, 2009. 16 с. [Е. А. Polikhach, *Permanent-magnet generator electrical systems of small vehicles*, (in Russian): The thesis abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences (05.09.03), Ufa State Aviation Technical University, 2009.]
2. **Исмагилов Ф. Р., Полихач Е. А., Фаррахов Д. Р., Ямалов И. И.** Разработка микропроцессорной системы зажигания для автономных объектов // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 262–264. [F. R. Ismagilov, and E. A. Polikhach, D. R. Farrakhov, I. I. Yamalov "Design of microprocessor ignition system for autonomous objects", (in Russian), in *Electrotechnical complexes and systems*, pp. 262-264, Ufa, 2011.]
3. **Полихач Е. А., Терегулов Т. Р., Исмагилов Ф. Р.** Вопросы улучшения искрообразования от магнето // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 12-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл. В 3 т. М.: МЭИ, 2006. Т. 2. С. 80. [Е. А. Polikhach, T. R. Teregulov, and F. R. Ismagilov, "Questions of improve sparking magneto," (in Russian), in *Proc. 12th Int. Sci. Conf. Moscow*, MPEI, 2006. Vol. 2, pp. 80.]

ОБ АВТОРАХ

ИСМАГИЛОВ Флюр Рашитович, проф., зав. каф. электро-механики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. электромеханических преобразователей энергии.

СУЛТАНГАЛЕЕВ Рафил Наилевич, доц. той же каф. Дипл. инж.- электромех. (УАИ, 1980). Канд. техн. наук по элементам и устройствам управления (УАИ, 1985). Иссл. в обл. управляемых механических преобразователей энергии.

ПОЛИХАЧ Евгений Александрович, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по электротехн. компл. и системам (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. магнитоэлектрических синхронных генераторов автономных систем.

ЯМАЛОВ Ильнар Илдарович, асп. той же каф. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. магнитоэлектрических синхронных генераторов автономных систем.

ФАРРАХОВ Данис Равилевич, асп. той же каф. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. управляемых механических преобразователей энергии.

METADATA

Title: Mathematic model of capacitor charge and discharge transient process in capacitor ignition system for motor transport.

Authors: F. R. Ismagilov, R. N. Sultangaleev, E. A. Polikhach, I. I. Yamalov, D. R. Farrakhov.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: outlegal@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 1 (62), pp. 60-63, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: As a part of motorized capacitor discharge ignition system development commutator power side equivalent circuit is investigated. Transient state voltage curves in primary and secondary winding ignition coil is analyzed. Acquired results were used during ignition system design and optimization.

Key words: Capacitor discharge ignition system; mathematic model; transient state; equivalent circuit; CDI.

About authors:

ISMAGILOV, Flyur Rashitovich, Prof., Head of dept. of electromechanics. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 1998).

SULTANGALEEV, Rafil Nailievich, associate Prof. of dept. of electromechanics. Candidat nauk (UAI, 1985)

POLIKHACH, Evgenii Aleksandrovich, associate Prof. of dept. of electromechanics. Candidat nauk (UGATU, 2009)

YAMALOV, Ilnar Ildarovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Electromechanics. Master of Engineering (UGATU, 2011).

FARRAKHOV, Danis Ramilevich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Electromechanics. Master of Engineering (UGATU, 2011).