

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЦЕПИ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОВТОРНОМ ИСКРООБРАЗОВАНИИ

© 2006 П.А. Николаев

ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти

Статья посвящена исследованию разрядных процессов, протекающих в высоковольтной цепи системы зажигания двигателя внутреннего сгорания. В работе рассмотрены вопросы, связанные с определением спектрального распределения сигнала при повторном искрообразовании. Проведены исследования динамики изменения разрядного тока в зависимости от состояния воздушно-топливной смеси в цилиндрах поршневого двигателя. Определена мощность сигнала протекающего в момент емкостной фазы электрического разряда на свече, при различных режимах работы ДВС.

В настоящее время основной парк автотранспорта составляют автомобили с бензиновыми двигателями, оснащаемые системой принудительного воспламенения воздушно-топливной смеси. Особенностью такой системы зажигания является то, что при ее работе генерируются электромагнитное излучение. При этом регистрируемый с помощью измерительной аппаратуры сигнал, представляет собой во временной области последовательность импульсов со случайной амплитудой и длительностью от 200 нсек. [1], вследствие чего помехи данного типа являются широкополосными, спектр которых находится в пределах до 1 ГГц. Данный вид излучения практически всегда преобладает над другими помехами в районах интенсивного автомобильного движения в зоне до 60 м от автострад [2]. Это является нежелательным фактором, влияющим на работу высокочувствительной радиоаппаратуры, внося паразитную составляющую как по приемопередающему каналу, так и индуцируя помехи в электронных схемах. Известно [3], что электромагнитное излучение генерируется током, протекающим в высоковольтном контуре системы зажигания в момент емкостной фазы электрического пробоя на свече. При этом амплитуда одиночного разрядного сигнала зависит от газодинамических параметров воздушно-топливной смеси [4]. Однако, не смотря на то, что электрический пробой достаточно полно исследован, до сих пор не рассмотрены зависимости амплитудно-частотного распределения тока в системе зажигания

транспортного средства от состояния воздушно-топливной смеси в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, связанные с явлением повторного искрообразования. Необходимость разработки математической модели, описывающей закономерности протекания сигнала при многоискровом разряде определяет актуальность темы исследования.

Суть явления повторного искрообразования заключается в том, что за первым емкостным пробоем межэлектродного зазора свечи зажигания следует серия других. При этом многоискровой процесс характерен при высокой степени турбулентности воздушно-топливной смеси в области ионизированного промежутка разрядника, а именно, когда выполняется условие:

$$P_{ИК} < P_{ВВС}, \quad (1)$$

где $P_{ИК}$ – давление плазмы в канале искры;

$P_{ВВС}$ – давление воздушно-топливной смеси, вектор которого ориентирован по нормали к межэлектродному зазору свечи зажигания.

При выполнении условия (1) происходит выдувание ионизированной среды, образованной в момент разряда.

Из [1] известно, что ток одиночного импульса, протекающего в момент емкостной фазы пробоя межэлектродного зазора свечи зажигания и имеющий характер аperiodически затухающего сигнала (Рис.1), определяется выражением:

$$i(t) = \frac{U_{np}}{\omega L_2} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (2)$$

где U_{np} – пробивное напряжение; α – коэффициент затухания; ω – основная частота элект-

трических колебаний высоковольтного контура.

$$\alpha = \frac{R_2}{2L_2}; \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{R_2^2}{4L_2^2} - \frac{1}{L_2C_2}}, \quad (4)$$

где R_2 – помехоподавляющее сопротивление; L_2 – индуктивность высоковольтной цепи; C_2 – шунтирующая емкость высоковольтного контура.

При многоискровом процессе, выборка отдельно взятого разрядного сигнала из ряда чередующихся емкостных фаз, определяется выражением (1). Однако при этом случайный характер имеет время момента возникновения пробоя, а также максимум амплитуды тока.

Границы временных интервалов, в которых наиболее вероятно появление повторного разряда, определяются исходя из соображений устойчивости дуги искры при воздействии на нее давления вихря воздушно-топливной смеси: $\Delta t \in (t_m; t_u]$, где t_m – время, при котором сигнал достигает своего экстремума; t_u – значение времени, соответствующее окончанию импульса, протекающего в емкостной фазе пробоя. Вне интервала Δt дуга искры устойчива, так как при $t \in [0; t_m]$, давление плазмы в канале больше, чем давление вихря воздушно-топливной смеси. После момента времени t_u , фаза пробоя переходит в тлеющий или дуговой разряд, а также происходит воспламенение топливного заряда. При этом фронт пламени, а соответственно и вектор давления газа ориентированы в направлении от свечи зажигания, вследствие чего создаются условия отсутствия повторного искрообразования.

Максимум функции (2) определяется выражением, который получается при нахождении экстремальных значений кривой $i(t)$:

$$t_m = \frac{\ln \frac{\alpha + \omega}{\alpha - \omega}}{2\omega}. \quad (5)$$

Вторая граница интервала Δt определяется из условия:

$$i(t_u) = 0.1 \times i(t_m). \quad (6)$$

Решая (6), определено время окончания емкостной фазы электрического разряда:

$$t_u = \frac{0.1 \times \ln(e^{-\alpha t_m} \times sh \omega t_m)}{\omega - \alpha}. \quad (7)$$

Исходя из расчетов математического моделирования, погрешность вычисления t_u по формуле (7) не превышает 9% от истинного значения.

Период времени ΔT , в котором наиболее вероятно появление пробоя искрового промежутка свечи зажигания, а также многоискрового разряда (рис.1), определяется из условия:

$$U_{np} = \lambda I_p \times e^{-\beta \times t} \sin \Omega_1 t, \quad (8)$$

где λ и β электрические параметры цепи системы; Ω_1 – угловая частота двух взаимосвязанных обмоток устройства накопления энергии; I_p – максимальный ток, протекающий в первичной обмотке катушки зажигания до момента разрыва. Нахождение λ , β и Ω_1 подробно рассмотрено в [3].

Правая часть выражения (8) представляет собой затухающий колебательный процесс в высоковольтной цепи системы зажигания при условии отсутствия пробоя. Решая (8), определен период времени ΔT , в котором наиболее вероятно появление пробоя искрового промежутка свечи зажигания:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - \frac{4U_{np}}{\Omega_1 \beta \lambda I_p}}. \quad (9)$$

При определении количества k повторных разрядов на искровом зазоре свечи зажигания в момент времени существования отдельно взятой выборки сигнала, протекающей в высоковольтном контуре системы зажигания, рассмотрены следующие предельные значения существования функции $i(t)$:

1. Условие (1) выполняется при $t=t_m$, тогда:

$$k_{max} = \frac{\Delta T}{t_m} = \frac{2\omega \times \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - \frac{4U_{np}}{\Omega_1 \beta \lambda I_p}}}{\ln \frac{\alpha + \omega}{\alpha - \omega}}, \quad (10)$$

2. Условие (1) выполняется при $t=t_u$, тогда:

$$k_{max} = \frac{\Delta T}{t_u} = \frac{(\omega - \alpha) \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - \frac{4U_{np}}{\Omega_1 \beta \lambda I_p}}}{0.1 \times \ln(e^{-\alpha t_m} \times sh \omega t_m)}, \quad (11)$$

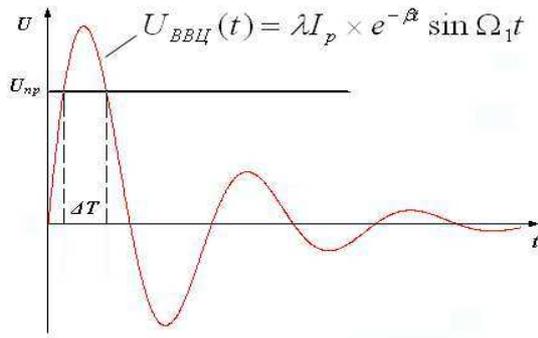


Рис. 1. Интервал времени, в котором наиболее вероятно появление многоискрового разряда

В выражении (2) параметром, зависящим от состояния воздушно-топливной смеси в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, является U_{np} , которое с учетом газодинамических соотношений определяется выражением:

$$U_{np} = 293 \times 10^{-5} U_{np,h} \frac{P_c}{T_c} h, \quad (12)$$

где $U_{np,h} = 3$ кВ/мм – относительное пробивное напряжение; P_c , T_c – давление и температура воздушно-топливной смеси в момент пробоя искрового зазора свечи зажигания.

На основании вышеприведенных выводов получена зависимость, описывающая многоискровую разряд во временной области (13):

$$i(t) = \begin{cases} 293 \times 10^{-5} U_{np,h} h \frac{P_{c_1}}{\omega L_2 T_{c_1}} e^{-\alpha t} sh \omega t, t \in [0; t_1] \\ 293 \times 10^{-5} U_{np,h} h \frac{P_{c_2}}{\omega L_2 T_{c_2}} e^{-\alpha t} sh \omega t, t \in (t_1; t_2] \\ 293 \times 10^{-5} U_{np,h} h \frac{P_{c_i}}{\omega L_2 T_{c_i}} e^{-\alpha t} sh \omega t, t \in (t_{i-1}; t_i] \\ \dots \dots \dots \\ 293 \times 10^{-5} U_{np,h} h \frac{P_{c_k}}{\omega L_2 T_{c_k}} e^{-\alpha t} sh \omega t, t \in (t_{k-1}; t_k] \end{cases}$$

где $t_1 \in (t_{m1}; t_{u1}]$, $t_2 \in (t_{m2}; t_{u2}]$, $t_i \in (t_{mi}; t_{ui}]$, $t_k \in (t_{mk}; t_{uk}]$ – время окончания соответствующего импульса тока;

U_{np_1} , U_{np_2} , U_{np_i} , U_{np_k} , – напряжение пробоя искрового зазора свечи зажигания при соответствующем повторном разряде.

Применяя к (15) преобразование Фурье, получено спектральное распределение тока:

$$i(f) = \frac{293 \times 10^{-5} U_{np,h} h}{t_k \omega L_2} \left(\int_0^{t_1} \frac{P_{c_1}}{T_{c_1}} e^{-\alpha t} sh \omega t \times e^{-j2\pi f t} dt + \dots + \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_{c_2}}{T_{c_2}} e^{-\alpha(t-t_1)} sh[\omega(t-t_1)] \times e^{-j2\pi f(t-t_1)} dt + \dots + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{P_{c_i}}{T_{c_i}} e^{-\alpha(t-t_{i-1})} sh[\omega(t-t_{i-1})] \times e^{-j2\pi f(t-t_{i-1})} dt + \dots + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{P_{c_k}}{T_{c_k}} e^{-\alpha(t-t_{k-1})} sh[\omega(t-t_{k-1})] \times e^{-j2\pi f(t-t_{k-1})} dt \right), \quad (14)$$

Электрическая мощность сигнала протекающего в высоковольтной цепи при повторном разряде, в заданном диапазоне частот, определяется зависимостью:

$$P^\Delta = \frac{0,086 \times 10^{-5} U_{np,h}^2 h^2}{t_k^2 \omega^2 L_2^2 (f_2 - f_1)} \left(\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{t_1} \frac{P_{c_1}}{T_{c_1}} e^{-\alpha t} sh \omega t \times e^{-j2\pi f t} dt + \dots + \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_{c_2}}{T_{c_2}} e^{-\alpha(t-t_1)} sh[\omega(t-t_1)] \times e^{-j2\pi f(t-t_1)} dt + \dots + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{P_{c_i}}{T_{c_i}} e^{-\alpha(t-t_{i-1})} sh[\omega(t-t_{i-1})] \times e^{-j2\pi f(t-t_{i-1})} dt + \dots + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{P_{c_k}}{T_{c_k}} e^{-\alpha(t-t_{k-1})} sh[\omega(t-t_{k-1})] \times e^{-j2\pi f(t-t_{k-1})} dt \right)^2 df, \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что условие, соответствующее критическому значению, а именно максимальной величине мощности многоискрового разрядного сигнала, есть соотношение:

$$\frac{P_{c_1}}{T_{c_1}} = \frac{P_{c_2}}{T_{c_2}} = \frac{P_{c_i}}{T_{c_i}} = \frac{P_{c_k}}{T_{c_k}}. \quad (16)$$

Так как из [3], согласно экспериментальным исследованиям, известно, что напряжение при первом пробое больше, чем напряжение последующих разрядных процессов, то справедливы соотношения:

$$\frac{P_{c_1}}{T_{c_1}} \geq \frac{P_{c_2}}{T_{c_2}}; \quad \frac{P_{c_1}}{T_{c_1}} \geq \frac{P_{c_i}}{T_{c_i}}; \quad \frac{P_{c_1}}{T_{c_1}} \geq \frac{P_{c_k}}{T_{c_k}}. \quad (17)$$

Согласно условию (17), для определения наибольшей из возможных величины мощности многоискрового разрядного сигнала необходимо знать отношение давления к температуре воздушно-топливной смеси в момент первого пробоя искрового зазора свечи зажи-

гания. При этом справедливо утверждение, что P_c / T_c максимально на конкретно заданной частоте вращения коленчатого вала при режиме работы двигателя внутреннего сгорания по внешней скоростной характеристике. Так как обеспечивается наибольшее наполнение цилиндров ДВС.

В процессе математического моделирования получены количественные показатели давления и температуры воздушно-топливной смеси в двигателе внутреннего сгорания, объемом $1,5\text{ м}^3$, соответствующие началу процесса искробразования, при его работе по внешней скоростной характеристике, а также, согласно выражению (12), определена величина пробивного напряжения. На рис.2 величины P_c , T_c , и U_{np} проинормированы к максимальным значениям, определенным при частоте вращения коленчатого вала ДВС $n=1000\text{ мин}^{-1}$:

$$P_{C,max} = 12,8 \times 10^5 \text{ Па}, \quad T_{C,max} = 662\text{ К},$$

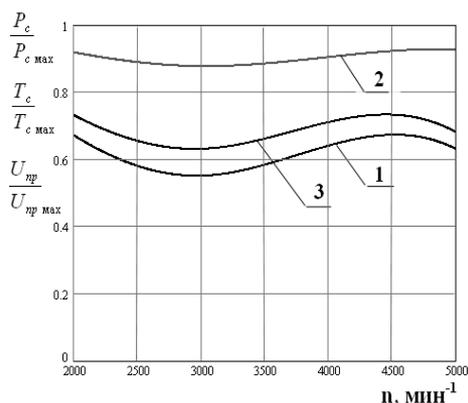
$$U_{np,max} = 17,12\text{ кВ}.$$


Рис.2 Зависимость давления, температуры и пробивного напряжения от оборотов коленчатого вала ДВС при его работе по внешней скоростной характеристике

В процессе исследований разрядных процессов, протекающих в системе зажигания, установленной на поршневом двигателе ВАЗ 2112, определено, что количество емкостных фаз электрического пробоя в отдельно взятом такте сжатия воздушно-топливной смеси не превышает $N=2$. При этом многоискровой разряд существует в области частот вращения коленчатого вала $n \geq 2000\text{ мин}^{-1}$. На основании полученных результатов проведен временной синтез сигнала, который есть алгебраическая сумма двойного пробоя (рис.3), а также опре-

делен его спектральный состав в области частот от 30 МГц до 1000 МГц (рис.4) при следующих параметрах электрической цепи: $U_{np1} = U_{np2} = 12540\text{ кВ}$; $R_2 = 5000\text{ КОм}$; $L_2 = 5 \times 10^{-6}\text{ Гн}$; $C_2 = 150 \times 10^{-12}\text{ Ф}$. Пробивное напряжение вычислено при частоте вращения коленчатого вала $n=2000\text{ мин}^{-1}$.

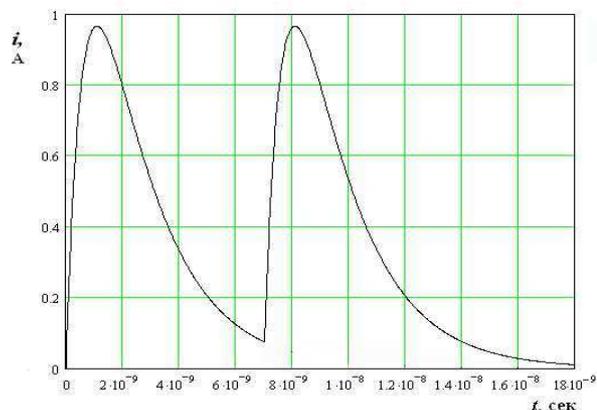


Рис.3. Повторный разряд с длительностью импульса $t=2t_u$

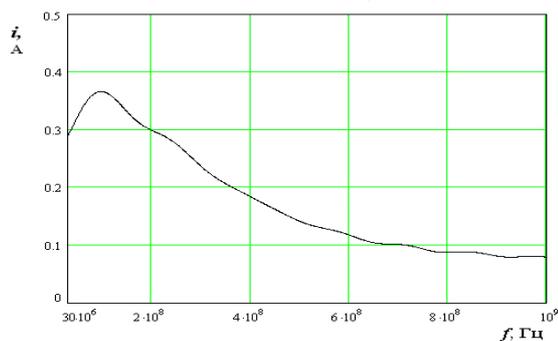


Рис.4 Спектральное распределение повторного разряда с длительностью $t=2t_u$

При помощи датчика тока [5], проведены исследования многоискрового разрядного процесса во временной (рис.5) и спектральной области (рис.6). Полученные результаты подтверждают сходимость экспериментальных данных и теоретических расчетов.

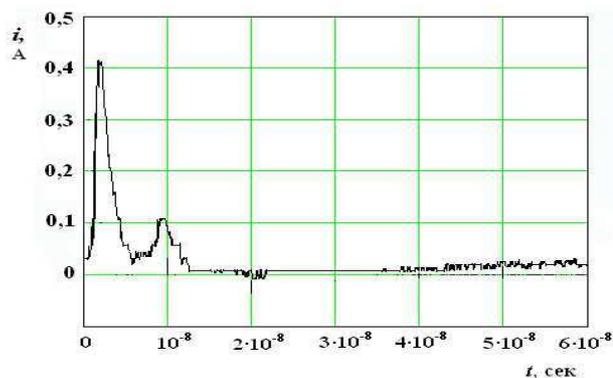


Рис.5 Экспериментальные исследования временной функции повторного разряда в высоковольтной цепи системы зажигания

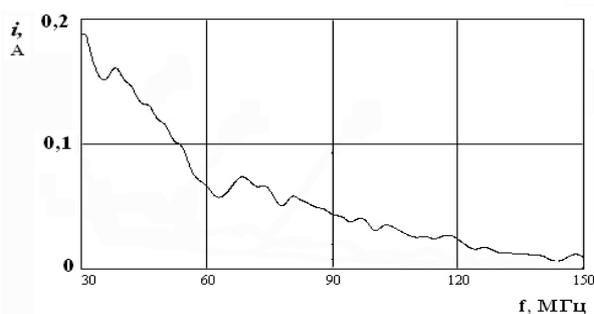


Рис.6. Экспериментальные исследования спектрального распределения повторного разряда в высоковольтной цепи системы зажигания

Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ причин, определяющих появление дополнительных емкостных фаз разрядного процесса. Установлено, что многоискровой разряд возникает при условии меньшего давления в канале искры по сравнению с давлением фронта вихря топливного заряда.

2. В процессе исследования получена функциональная зависимость спектрального распределения тока от газодинамического состояния воздушно-топливной смеси, электрических параметров высоковольтного контура, а также от времени возникновения повторного пробоя искрового промежутка на свече.

3. Разработана математическая модель зависимости мощности электрического сигнала при повторном пробое искрового промежутка свечи зажигания от частоты вращения коленчатого вала. Определены

условия газодинамических соотношений давления и температуры в момент начала искрообразования в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, соответствующие максимальному уровню помех.

4. Проведены экспериментальные исследования спектрального распределения многоискрового разрядного сигнала, подтверждающие корректное применение разработанной математической модели.

Список литературы

1. Николаев П.А., Фокин А.С. Исследование параметров излучаемой помехи от режимов работы двигателя // Сборник научных докладов. V Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. - Санкт-Петербург, ЛЭТИ 2003. – с.61.
2. Максимов М.В. Защита от радиопомех М.: Советское радио, 1976. – 496 с.
3. Балагуров В.А. Аппараты зажигания. - М.: Машиностроение, 1964.–351с.
4. Николаев П.А. Исследование динамики разрядных процессов в системе зажигания ДВС и излучаемых радиопомех // “Автомобильная промышленность” №5, Москва, 2006. С.13-15.
5. Свидетельство на полезную модель №42898 Россия, Датчик тока / Николаев П.А. - Оpubл. 2004, Бюл. №35.

THE RESEARCH OF DISCHARGE PROCESSES, RESULTING AT THE IGNITION HIGH-VOLTAGE SYSTEM ENGINE IN SECONDARY SPARK FORMATION TIME

© 2006 P.A. Nikolaev

«AVTOVAZ», Togliatti

This article has dedicated to discharge processes research, resulting at the explosion engine ignition high-voltage systems. The job considers the questions of determining of signal spectral distribution in secondary spark formation time. Was fulfill the investigation discharge current variation dynamics depending on air-fuel mixture state at the piston engine cylinder. Specified the power of signal, proceeding at capacitive phase moment of electrical discharge on spark for engine different conditions.