

УДК 621.43.05, 537.5

С.Н. Нагорных¹, Е.В. Нагорных²**СЛУЧАЙНАЯ КОМПОНЕНТА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СО СВЕЧЕЙ ЗАЖИГАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева¹,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²

Измерена случайная компонента скорости вращения вала двигателя внутреннего сгорания со свечой зажигания, ее плотность вероятности, аппроксимированная стационарным решением уравнения Фоккера-Планка. Найдены два критических параметра режимов работы свечи и двигателя внутреннего сгорания. Рассмотрены тепловые и электромагнитные виды работы статистического запаздывания зажигания свечи для стимулированной (экзоэлектронной) эмиссии металлов. Измерения проводились на двигателе ВАЗ 11163 в стационарном режиме холостого хода. Применялась стандартная схема зажигания свечи. Погрешность измерения скорости вращения вала по бортовому компьютеру была ± 5 оборотов в минуту. Результаты измерения случайной компоненты скорости вращения вала можно применять для конструирования и контроля режимов работы двигателя внутреннего сгорания с преимущественно холостым ходом. Другим вариантом применения результатов работы является конструирование новых свечей зажигания.

Ключевые слова: вал двигателя внутреннего сгорания, случайная скорость вращения, плотность вероятности, статистическое время запаздывания, зажигание свечи, экзоэлектронная эмиссия.

В [1] детально рассмотрена термодинамика работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Кроме того, даны регулярные неустановившиеся режимы работы ДВС, которые определены как одновременное изменение двух параметров холостого хода (ХХ). Неустановившиеся режимы состоят из переходных (например, пуск ДВС) и статических (например, неработающий; (ХХ), нагруженный ДВС) режимов, которые на самом деле могут быть стационарными. Самым быстрым фактором, реагирующим на подачу топлива, названа скорость вращения вала.

В действительности таким процессом является работа свечи зажигания. В [2] природа работы ДВС определена как случайные колебания давления воздушно-топливной смеси (ВТС), через временные ряды нормально распределенных величин, с двумя параметрами. Приведена техника измерения виброакустического спектра 2-5 кГц стяжной шпильки блока цилиндров. Вибросигнал синхронизировался узкополосным фильтром от индуктивного датчика оборотов вала ДВС. Действительно, сигнал являлся спектром случайных колебаний стяжной шпильки, но связь этих колебаний со случайными колебаниями давления ВТС не рассмотрена. Очевидно, что в сигнал как-то вмешиваются изгибно-крутильные колебания вала и изгибно-растягивающие колебания напряжений корпуса двигателя в месте расположения шпильки. Нормальную плотность вероятности случайных величин вибросигнала авторы [2] не приводят.

Целью данной работы является измерения скорости вращения вала ДВС X предварительным определением её как случайной величины X , получение её плотности вероятности и объяснение с точки зрения режимов работы свечи и ДВС. Измерения X , температуры, напряжения аккумулятора проводились на ВАЗ 11183 по бортовому компьютеру. Погрешность X составляла ± 5 об/мин. Применялась стандартная катушка зажигания и свечи BCPR6ES фирмы NGK.

На рис. 1 приведены результаты измерения плотности вероятности X на ограниченном участке [760;860] оборотов в минуту и её возможная аппроксимация (кривая с треугольниками) в MS Excel. График рис. 1 даётся стационарной функцией $P_s(x)$ [3], а не функцией нормальной плотности вероятности:

$$P_{s(x)} = N \cdot x^{\frac{2\lambda}{\sigma^2} - \nu} \cdot e^{-\frac{2x}{\sigma^2}}, \quad (1)$$

где N - нормирующая постоянная, $\nu=1$ по Стратоновичу, $\nu=2$ по Ито и два важных параметра: λ - разность двух динамических параметров, σ^2 - интенсивность белого шума. Самым быстрым процессом работы ДВС является работа свечи зажигания, т.к. она задает момент и режим горения (ВТС) и только как следствие скорость вращения вала ДВС. Определим X как t_p^{-1} - обратное время зажигания и горения свечи относительно момента подачи напряжения на свечу в нагруженном режиме на ограниченном интервале t_p :

$$t_p = t_{CB3} + t_\phi + t_2, \quad (2)$$

где t_{CB3} - статистическое время запаздывания [4], t_ϕ - время формирования электрического разряда до режима горения, t_2 - время горения разряда и ВТС.

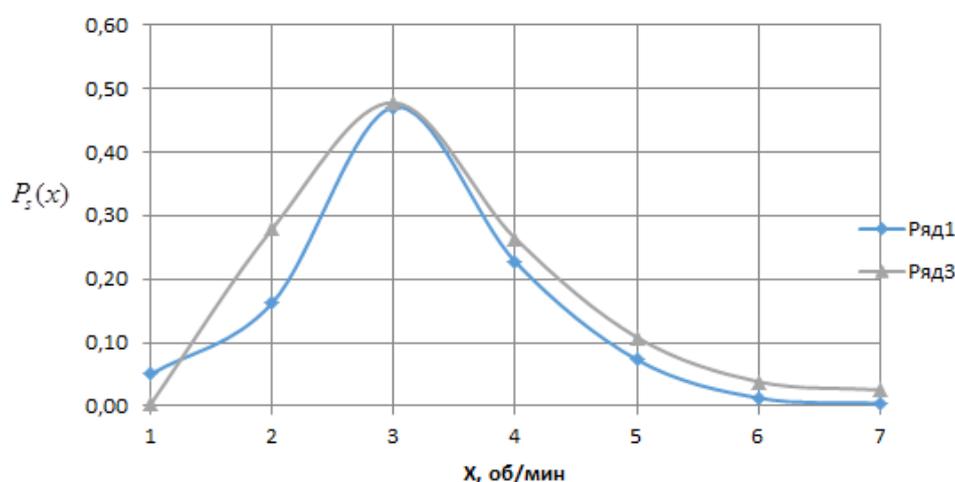


Рис. 1. Плотность вероятности случайной компоненты скорости вращения

Нагруженным режимом свечи назовём равенство (2) в интервале средней температуры свечи $500-900^{\circ}C$ и образовании в межэлектродном промежутке объемного заряда перед диффузионным пробоем.

При включении сцепления и движении с постоянной скоростью по прямой на гладкой дороге скорость вращения вала становится детерминированной в рамках погрешности электронного тахометра (интервал случайной величины X стягивается в точку). Это означает, что функция (1) переходит в дельта-функцию $\delta(x - x_0)$. В [3] доказано, что это соответствует стремлению к нулю отношения двух параметров

$$\frac{2\lambda}{\sigma^2} \rightarrow 0 \quad (3)$$

при $\nu=1$ за счёт $\lambda \rightarrow 0$. Тогда запуск двигателя, как переходный процесс [1], можно объяснить переходом $\delta(x)$ в $P_s(x)$. Согласно [3] определим постоянную λ как:

$$\lambda = J_- + J_+, \quad (4)$$

где J_- - производная по времени от числа электронов в секунду, J_+ - производная по времени от числа положительных ионов в секунду, уходящих с катода свечи (нейтрализованных на катоде). Таким образом, переход с режима ХХ на нагруженный режим свечи и ДВС (4) связан с $J_- \rightarrow -J_+$ и почти полным равенством скоростей уходящего тока электронов и положительных ионов с катода свечи. Уточняем, при сгорании ВТС положительные ионы ВТС адсорбируются на катоде свечи. При этом уходящая производная тока возрастает, и на свече

начинают работать катоды из другого материала, легче обеспечивающую десорбцию положительных ионов, что и реализуется на практике (Pt).

Если свеча прогрета выше $850^{\circ}C$, положительные ионы почти не адсорбируются на катод во время горения ВТС, а значит, и почти нет десорбции $J_+ \ll J_-$, т.е. $J_+ \approx 0$, которая необходима для перехода в нагруженный режим $J_- \approx J_+$ при заметном J_- . Десорбция также нагружает диффузионный пробой в свече на горение ВТС в цилиндре. Когда это нарушается, то искровой пробой возбуждает в горении ВТС ударные волны, т.е. детонацию (видим на практике даже разрушения ДВС). Если средняя температура свечи меньше $450^{\circ}C$, адсорбция превышает десорбцию. Свеча покрывается продуктами горения или топливом $J_+ \gg J_-$ и электроны нейтрализуются положительно адсорбированными ионами и их число не увеличивается при вылете из катода $J_- = 0$, что нарушает (4, 3). Свеча может выйти из строя (нарушены электроизоляционные свойства) при пуске двигателя, как это происходит на практике.

По данным Тихомирова А.Н. при работе ДВС на газе (4000 оборотов в минуту, XX) со временем теряется крутящий момент из-за изменения состояния свечи значительно раньше, чем при работе на бензине. Переход на бензин заметно восстанавливает состояние свечи и крутящий момент. Замена свечи полностью восстанавливает крутящий момент ДВС. Это можно объяснить следующим образом. Т.к. ток горения свечи идет через зону проводимости окисла и за счет туннельного механизма и скачка температуры (приблизительно $1500^{\circ}C$), то поверхностный потенциал со временем почти не меняется на бензиновой ВТС и повышается на газе. Если ток горения свечи идет через центр хемосорбции окисла по туннельно-термическому механизму, то, по-видимому, бензиновая ВТС создает дополнительный центр, частично уносит продукты горения, дает объемное горение ВТС. Газовая ВТС не создает дополнительные центры, не уносит продукты горения, частично дает поверхностное горение ВТС. Скачки температуры, примерно $1500^{\circ}C$, и средняя температура $850-450^{\circ}C$ не вызывает стационарной термоэлектронной эмиссии, так как $0,13$ эВ меньше поверхностного потенциала до дна зоны проводимости $\sim 0,5$ эВ. Это активирует окисление свечи, на которой наблюдаются цвета побежалости (F, F' - центры окраски в окисле или центры хемосорбции). Тунельно-темоэлектронный механизм эмиссии электронов в [4] назван стимулированной экзотермической эмиссией.

Важным элементом рассматриваемых процессов является возникновение случайного запаздывания t_{CB3} пробоя в свече от катушки индуктивности.

Вторичная обмотка по команде индуктивного датчика оборотов вала возбуждает и прикладывает к свече высоковольтное колебание напряжения. В силу изменения во времени полей электрической и магнитной напряженности \vec{E} , \vec{H} (свеча с промежутком между электродами l) согласно уравнениям Максвелла возникает краевое условие для плотности тока проводимости (электронной эмиссии) $\dot{\vec{\sigma}} = \vec{j}$ (σ - поверхностный заряд на катоде свечи). Она равна плотности тока смещения в зазоре l свечи, заполненным ВТС, $\vec{j}_{\text{смещ}} = \dot{\vec{D}}$ (\vec{D} - вектор эл. смещения). Краевое условие, т.е. непрерывность числа силовых линий плотности тока, имеет вид

$$\dot{\vec{\sigma}} = \dot{\vec{D}} \quad (5)$$

и равенство для замкнутой цепи вторичной катушки и свечи:

$$\vec{j}_n = \vec{j} + \vec{j}_{\text{смещ}}, \quad (6)$$

где \vec{j}_n - плотность полного (суммарного) тока. При изменении во времени $\vec{H}(t)$, вызванного \vec{j} , растёт $\vec{D}(t)$ и увеличивается $\vec{\sigma}(t)$. Тогда имеем [4]

$$\dot{\vec{\sigma}}(t) = \frac{2}{t_{CB3}(t)}, \quad (7)$$

где $\bar{t}_{CЗВ}(t)$ - среднестатистическое время запаздывания пробоя свечи двумя случайными электронами из катода при атмосферных условиях. При этом обнаружено сходство рис. 1 и плотности вероятности $t_{CЗВ}(t)$ воздушного разрядника [4]. Если бы выполнялось начальное условие $J_+ = j_{смещ} = 0$, то реализовался бы конденсаторный пробой с задержкой на 180 градусов фазы колебания напряжения катушки зажигания теми же случайными начальными электронами и возможной детонацией. Иначе возникает случайное колебание напряжения смещения, приложенное к свече без запаздывания. Через некоторое время это напряжение превысит напряжение зажигания свечи электронами проводимости. Если это время больше $t_{CЗВ}(t)$, то мы имеем $t_{CЗВ}(t)$ в зажигании свечи. Когда $t_{CЗВ} \approx t_2$, наблюдаются на практике пропуски зажигания ВТС. Если время меньше $t_{CЗВ}(t)$, то мы не имеем случайного запаздывания зажигания свечи. Оба варианта дают случайный импульс валу ДВС на ХХ. Таким образом, работа свечи зажигания объясняет появление случайной компоненты скорости вращения вала и переходы на стационарные режимы ДВС.

Библиографический список

1. **Орлин, А.Г.** Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / А.С. Орлин А.С., М.Г. Круглов, М.Г. Круглов. – М.: Машиностроение, 1983. – 375 с.
2. **Кирюхин, С.Н.** Математическая модель дизельного двигателя. Научные проблемы специальных военно-строительных и фортификационных комплексов, обустройства войск и управления производственной деятельностью строительных предприятий МО РФ / С.Н. Кирюхин, А.О.Шиманская // Сборник научных трудов НИГ-1 ВИТУ. СПб. – 2006. – Вып. 5. – С. 543–552.
3. **Нагорных, С.Н.** Плотность вероятности как решение уравнения Фоккера-Планка в индуцированных шумом переходах / С.Н. Нагорных, Д.С. Саблуков // Журнал Средневожского математического общества. – 2015. – Т. 17. № 1. – С. 11–13.
4. **Нагорных, С.Н.** Роль вакансионных дефектов в стимулированной (экзоэлектронной) эмиссии металлов: автореф. дис... канд. физ.-мат. наук / С.Н. Нагорных. – Горький: ГГУ, 1975. – 19 с.

*Дата поступления
в редакцию 23.04.2016*

S. N. Нагорных¹, Е. V. Нагорных²

RANDOM COMPONENT OF THE SPEED OF ROTATION OF THE SHAFT INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH THE SPARK PLUGS

The Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeyev¹,
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod²

A random component of crankshaft engine rotation velocity is measured. The probability density of rotation velocity is found. It is approximated by the stationary solution of Fokker-Plank equation. The critical parameters of noise-induced transitions of a spark plug and an engine under operating conditions are given. A random component of rotation velocity is characterized by the statistic delay of a spark plug ignition by stimulated (exoelectron) emission of the cathode. The measurements are made for VAZ 11183 engine performed in the stationary idle running. The standard spark plug ignition is used. The measurement error of the engine rotation velocity by aboard computer comes to ± 5 revolutions per minutes. The measurement results of a random component of crankshaft rotation velocity may be used for construction and control of the engine operating conditions with primary idle running. Another application of the results is construction a new spark plug ignition.

Key words: crankshaft engine, rotation velocity, probability density, statistic time delay, spark plug ignition, exoelectron emission.