

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ОЗОНИРОВАННОМ ТОПЛИВЕ

Докт. техн. наук, проф. ПИЛИПЕНКО О. М.<sup>1)</sup>, инж. ВАСИЛЬЧЕНКО В. Ю.<sup>1)</sup>,  
кандидаты техн. наук, доценты ПОДГОРНЫЙ Н. В.<sup>1)</sup>, ПИЛАТОВ А. Ю.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Черкасский государственный технологический университет,

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет

E-mail: viktoravto@mail.ru

Разработаны математическая модель электронной системы управления углом опережения зажигания в двигателе внутреннего сгорания, работающем на озонированном топливе, и алгоритм управления его системой зажигания. Создана структура динамической системы зажигания с использованием блока управления подачи озона в топливо для повышения экологических и экономических показателей автомобиля, адаптированных к условиям эксплуатации. Применение данной системы позволяет за счет дозирования оптимального количества озона в топливо обеспечить снижение расхода бензина и концентрации продуктов неполного сгорания с точки зрения минимумов в условиях эксплуатации.

Представлена управляемая система зажигания автомобиля как последовательная схема, которая имеет множество дискретных входов, дискретных выходов и дискретных внутренних состояний. Схема устанавливает функциональную зависимость между состояниями входа и выхода. Проведена оценка экологических показателей по массовым выбросам оксида углерода CO углеводородов C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, оксидов азота NO<sub>x</sub>, выполнен анализ результатов исследований.

Предложенная математическая модель электронной системы управления углом опережения зажигания в двигателе внутреннего сгорания, работающем на озонированном топливе, позволяет: использовать математическую модель для определения показателей работы двигателя внутреннего сгорания от изменения угла опережения зажигания; осуществлять исследование влияния изменения параметров угла опережения зажигания на показатели работы автомобиля, в частности оценить его топливную экономичность и токсичность в условиях эксплуатации. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего исследования озонирования топлива всех типов автомобилей.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, активация топлива, озон, математическая модель.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

## SYNTHESIS OF AUTOMOBILE IGNITION SYSTEM USING OZONIZED FUEL

PILIPENKO O. M.<sup>1)</sup>, VASILCHENKO V. Yu.<sup>1)</sup>, PODGORNY N. V.<sup>1)</sup>, PILATOV A. Yu.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Cherkasy State Technological University,

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University

The paper presents a mathematical model for electronic control system of an ignition advance angle in the internal combustion engine, which is running on ozonized fuel. An algorithm for ignition system control of internal combustion engine using ozonized fuel has been developed in the paper. A structure of the dynamic ignition system while using a control unit for supplying ozone into fuel has been created with a purpose to improve automobile ecological and economical indices adapted to operational conditions. Application of the given system allows to ensure minimum reduction of operational petrol consumption and concentration of incomplete combustion products due to optimum ozone dosage into the fuel.

The paper proposes a controlled automobile ignition system as a sequential scheme which has a great number of discrete inputs and outputs and many discrete internal states. The scheme establishes a functional dependence between input and output states. The paper provides an assessment of ecological indices according to massive emissions of carbon monoxide CO, hydrocarbon C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> and nitric oxide NO<sub>x</sub>. The analysis of the investigation results has been carried out in the paper.

The proposed mathematical model for electronic control system of an ignition advance angle in the internal combustion engine running on ozonized fuel makes it possible: to use the mathematical model for determination of the ICE operational indices due to changes in the ignition advance angle; to carry out investigations on the influence of changes in parameters of the ignition advance angle on the automobile operational indices, in particular to estimate its fuel economy and toxicity under operational conditions. The obtained results can be used for further investigations on fuel ozonizing for all types of automobiles.

**Keywords:** internal combustion engine, fuel activation, ozone, mathematical model.

Fig. 1. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Сокращение нефтяных ресурсов планеты, ухудшение ее экологии ведут к необходимости создания и использования современных технологий для обеспечения дальней-

шего совершенствования рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС), в первую очередь процессов смесеобразования и сгорания. Одним из способов дальнейшего

совершенствования процессов смесеобразования и сгорания может быть использование на автомобильном транспорте озона как активатора топлива и топливно-воздушной смеси для повышения числа возбужденных и ионизированных частиц в горючей смеси (активных радикалов). Наличие таких частиц оказывает положительное влияние на интенсивность протекания процессов смесеобразования и сгорания, приводит к улучшению показателей рабочего процесса двигателя автомобиля в условиях эксплуатации [1]. Следующая, не менее важная задача – доработка и переоборудование уже существующих автомобильных систем для работы на озонируемом топливе. При этом электронное управление ДВС таких автомобилей в целом должно обеспечивать выполнение трех задач, а именно: максимальную создаваемую мощность, топливную экономичность и экологичность.

**Цель и постановка задачи.** Рассмотрим усовершенствование электронной системы зажигания на примере двигателя ЗМЗ-402 автомобиля ГАЗ-3110 «Волга» с учетом возможности непрерывного регулирования и управления процессом подачи озона в топливо непосредственно во время работы автомобиля. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель системы зажигания автомобиля, что позволит упростить описание локальных процессов управления зажиганием;
- разработать алгоритм управления системой зажигания ДВС на озонируемом топливе;
- сформировать структуру системы зажигания с использованием блока управления подачей озона в топливо для повышения экологических и экономических показателей автомобиля в условиях эксплуатации.

**Материалы и результаты исследования.** На сегодняшний день в автомобильном производстве Украины угол опережения зажигания (УОЗ) устанавливается по таблицам и регулируется разомкнутым методом [2, 3]. Такие системы предназначены для адаптации УОЗ в зависимости от состава топливной смеси. Управляющий параметр системы – УОЗ, находящийся в зависимости от выбранного режима и рабочих параметров ДВС автомобиля. Второй

подход – замкнутый метод, используемый лишь при управлении по детонации [4, 5]. Кроме того, УОЗ не используется в качестве управления переходными режимами холостого хода.

В зарубежной автомобильной промышленности [6, 7] вопрос управления ДВС ставится значительно шире. Во-первых, особо важное – это математическое моделирование двигателя в зависимости от влияния УОЗ на его работу. Во-вторых, большинство управляющих процессов разрабатываются на основе замкнутых систем, разрешающих поддерживать заданные управляемые параметры двигателя в определенных границах в процессе эксплуатации ДВС. Кроме этого, в [8] определено, что УОЗ используется в качестве управляющего параметра в нескольких случаях, а именно: определяет оптимальные параметры работы двигателя, служит дополнительной системой по регулированию холостого хода.

В исследовании авторов система зажигания для ДВС на озонируемом топливе – это сложный логико-динамический объект. Поэтому обоснованный выбор параметров создания топливной смеси в соответствии с указанными выше качествами ДВС может быть осуществлен только на основе системного подхода [9, 10]. Например, при исследовании и синтезе системы зажигания с использованием системы управления, функционирующей вместе с системой анализа газодинамики топливной смеси. Рассмотрим управляемую систему зажигания автомобиля как последовательную схему, которая имеет множество дискретных выходов, дискретных входов и дискретных внутренних состояний. Схема устанавливает функциональную зависимость между состояниями входа и выхода.

Уравнения, которые определяют состояние асинхронного управляющего автомата Мура [6]  $M$  при  $t = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (t + \varepsilon)$ , имеют вид:

$$\begin{aligned} z(t) &= z[y(t), s(t)]; \\ s &= (t^+) = s[y(t), s(t)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $z(t)$  – состояние выхода;  $y(t)$  – то же входа;  $s(t)$  – внутреннее состояние конечного автомата  $M$  в момент времени  $t$ . При этом  $z(t)$ ,  $y(t)$ ,  $s(t)$

могут принимать последовательность значений  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}, \{y_1, y_2, \dots, y_p\}, \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  соответственно.

Полное состояние  $T(t)$  автомата  $M$  определяется как  $T(t) = [s(t), y(t)]$  и может принимать значения  $\{(s_1, y_1), (s_2, y_2), (s_i, y_i)\}$ , если  $t^+ = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (t + \varepsilon)$ .

Тогда  $T(t^+) = T(t)$ . Такое согласование разрешит провести выбор параметров системы зажигания с учетом критических режимов функционирования ДВС.

Рассматриваемая динамическая система описывается следующей системой дифференциальных уравнений, где асинхронный конечный регулятор имеет  $n$  внутренних состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= X_1(x_1, \dots, x_n) + U_1(s_1, f_1, x_1, \dots, x_n); \\ \dot{x}_2 &= X_2(x_1, \dots, x_n) + U_2(s_2, f_2, x_1, \dots, x_n); \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{x}_n &= X_n(x_1, \dots, x_n) + U_n(s_n, f_n, x_1, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x$  – состояние динамической системы  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ;  $f$  – возмущение (озон)  $f = (f_1, \dots, f_n)$ ;  $U$  – управляющее воздействие, определенное как функция внутреннего состояния конечного автомата, возмущения и изменения состояния динамической системы  $U = (U_1, \dots, U_n)$ .

Если  $x, X, U$  рассматривать как компоненты векторов, то система уравнений (2) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= X(x) + U(s, f, x); \\ x(0) &= x^0; \quad s = (0); \quad f(0) = f^0. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку конечный автомат управляет динамической системой (системой зажигания),

выходные сигналы автомата должны быть преобразованы в действительные числовые значения, а действительные числовые значения переменных динамической системы – в дискретные значения (рис. 1).

Пусть  $\zeta(t)$  – функция переключателя – обусловлена как:

$$\zeta_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } z(t) = z_i; \\ 0, & \text{если } z(t) \neq z_i; \end{cases}$$

$\zeta$  – вектор с компонентами  $\zeta_i$ ;  $A$  – постоянная матрица с элементами, определенными в области действительных чисел.

Тогда получим действительное векторное уравнение

$$U(s, x) = A\zeta. \quad (4)$$

Каждому возможному значению дискретного сигнала входа  $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_p$  должно соответствовать определенное множество значений переменных состояния  $x_j$ .

Пусть  $X^n$  –  $n$ -мерное декартово пространство, определенное координатами  $x_j$ , и пусть  $X^n$  разделено с помощью  $p$ -делений на  $n$ -мерные подпространства  $X_1^n, X_2^n, \dots, X_p^n$  (граничная линия между  $X_i^n$ - и  $X_j^n$ -подпространствами называется линией переключения). Связывая  $y_i$  с  $X_i^n$ , будем иметь  $y(t) = y_i$  тогда и только тогда, когда  $x \in X_i^n$ , или

$$y(t) = \sum y_i [\mu(X_i^n, x)], \quad (5)$$

где  $\mu(X_i^n, x)$  – функция переключателя, определяется как:

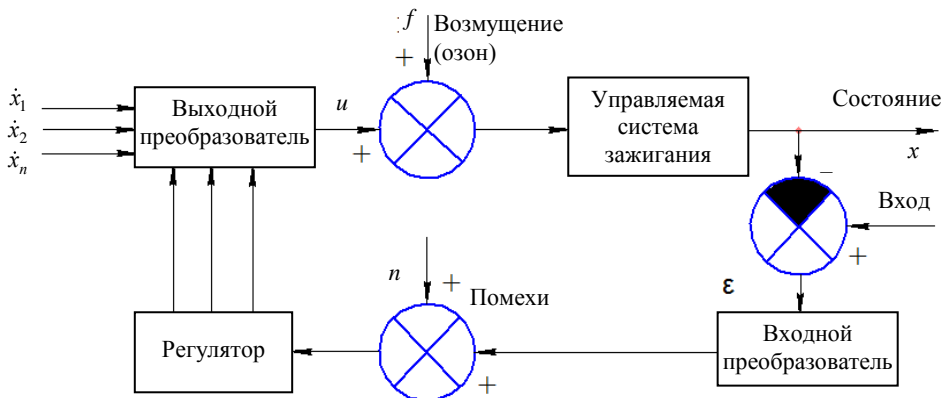


Рис. 1. Управляемая система зажигания автомобиля

$$\mu(X_i^n, x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in X_i^n; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

Из формулы (5) видно, что вход автомата (регулятора) есть функция переменной состояния объекта управления. Поэтому (5) целиком описывает функцию  $U(s, x)$ .

Приведенные математические уравнения иллюстрируют закон функционирования системы зажигания с дискретно изменяемыми входными сигналами и квантованием непрерывного управляющего влияния.

Выходной сигнал регулятора есть дискретная выходная последовательность, связанная с дискретной последовательностью входа, и эта зависимость определяется внутренним состоянием автомата (системы зажигания). Таким образом, синтез системы зажигания автомобиля состоит в:

- формировании стратегии управления или закона управления, которое описывает выходной сигнал регулятора как функцию состояния динамической системы;
- формировании стратегии автомата, раскрывающей зависимость «вход – выход»;
- детальном синтезе логической схемы конечного автомата.

Для определения влияния величины УОЗ на показатели работы двигателя ЗМЗ-402 автомобиля ГАЗ-3110 «Волга» при использовании бензина, обработанного разной дозой озона, были выполнены расчеты расхода топлива и экологических показателей. Экологические показатели оценивали по массовым выбросам оксида углерода CO, углеводородов  $C_nH_m$ , оксидов азота  $NO_x$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Влияние УОЗ на расход топлива и экологические показатели автомобиля ГАЗ-3110 «Волга» при движении по режимам Европейского городского ездового цикла по ГОСТ 20306–90**

Параметр		Доза озона в топливе АИ-92, г/кг <sub>топл</sub>			
		0	0,2	0,4	0,8
Расход топлива	кг/ч	4,15	4,020	3,840	4,230
Массовые выбросы	CO, %	0,42	0,292	0,251	0,318
	$C_nH_m$ , мг/м <sup>3</sup>	1850,00	1215,000	1023,000	1078,000
	$NO_x$ , мг/м <sup>3</sup>	200,00	203,000	205,000	209,000

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что в случае установления штатного УОЗ при питании двигателя бензином, обработанным дозой озона 0,2–0,4 г/кг<sub>топл</sub>, улучшаются показатели топливной экономичности по сравнению со стандартным бензином на 3–5 %. Использование бензинов с дозой озона 0,8 г/кг<sub>топл</sub> ухудшает топливную экономичность автомобиля на 2 %.

В ходе проведенных расчетов установлено, что озон как добавка интенсифицирует сгорание топлива в двигателе, снижая содержание токсичных соединений: углеводорода – в среднем на 40–45 %, оксида углерода – в среднем на 30–40 %. Содержание оксидов азота увеличивается на 2–5 %. Пик снижения концентрации токсичных соединений в двигателе автомобиля приходится на горение бензина с содержанием озона 0,4 г/кг<sub>топл</sub>.

## ВЫВОДЫ

Предложенная математическая модель электронной системы управления углом опережения зажигания в двигателе внутреннего сгорания, работающем на озонированном топливе, позволяет:

- использовать математическую модель для определения показателей работы двигателя внутреннего сгорания от изменения угла опережения зажигания;
- осуществлять исследование влияния изменения параметров угла опережения зажигания на показатели работы автомобиля, в частности оценить его топливную экономичность и токсичность в условиях эксплуатации.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего исследования озонирования топлива всех типов автомобилей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Експериментальні дослідження екологічних показників двигуна ГАЗ-3110 з обробкою палива озоном / В. Ю. Васильченко [и др.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – № 4. – 109–113.**
2. **Соснин, Д. А.** Новейшие автомобильные электронные системы / Д. А. Соснин, В. Ф. Яковлев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.
3. **Синельников, А. Х.** Электронные приборы для автомобилей / А. Х. Синельников. – М.: Энергоиздат, 1986. – 239 с.
4. **Моргулев, А. С.** Полупроводниковые системы зажигания / А. С. Моргулев, Е. К. Сонин. – М.: Энергия, 1968. – 64 с.

5. **Росс, Твег.** Системы зажигания легковых автомобилей: практ. пособ. / Твег Росс. – М.: За рулем, 2004. – 96 с.

6. **Авербух, И. И.** Стабилизированная электронная система зажигания / И. И. Авербух // Радио. – 1997. – № 1. – С. 26–27.

7. **Guzzella, L.** Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems / L. Guzzella, C. H. Onder // Springer Berlin Heidelberg. – 2010. – 354 p.

8. **Cook, J. A.** Engine Control / J. A. Cook, J. W. Grizzle, J. Sun // The Control Handbook / William S. Levine, Ed. – CRC Press, 1996. – P. 1261–1274.

9. **Тимченко, А. А.** Основы системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки / А. А. Тимченко. – К.: Либідь, 2004. – 288 с.

10. **Тимченко, А. А.** Дослідження структур та моделювання процесів управління багаторежимним об'єктом автономного функціонування / А. А. Тимченко, М. В. Підгорний, В. В. Войко // Збірник наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2010». – Херсон, 2010. – С. 218–220.

#### REFERENCES

1. **Vasil'chenko, V. Iu.,** Gromiko, A. V., Pilipenko, O. M., & Stoliarenko, G. S. (2010) Experimental Investigations on GA3-3110 Engine Indices with Adding Ozone Into Fuel. *Visnik Cherkas'kogo Derzhavnogo Tekhnologichnogo Universitetu* [Proceedings of Cherkasy State Technological University], 4, 109–113 (in Russian).

2. **Sosnin, D. A.,** & Yakovlev, V. F. (2005) *State-of-the-Art Automobile Electronic Systems*. Moscow, SOLON-Press. 240 p. (in Russian).

3. **Sinelnikov, A. Kh.** (1986) *Electronic Devices for Automobiles*. Moscow, Energoizdat. 239 p. (in Russian).

4. **Morgulev, A. S.,** & Sonin, E. K. (1968) *Semiconductor Ignition System*. Moscow, Energia. 64 p. (in Russian).

5. **Ross, Tveg.** (2004) *Vehicle Ignition Systems*. Moscow, Publishing House Za Ruliom. 96 p. (in Russian).

6. **Averbukh, I. I.** (1997) Stabilized Electronic Ignition System. *Radio* [Radio], 1, 26–27 (in Russian).

7. **Guzzella, L.,** & Onder, C. H. (2010) *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer Berlin Heidelberg. 354 p. Doi: 10.1007/978-3-642-10775-7.

8. **Cook, J. A.,** Grizzle, J. W., & Sun, J. (1996) Engine Control. *The Control Handbook*. William S. Levine, Ed. CRC Press, 1261–1274.

9. **Timchenko, A. A.** (2004) *Basic Principles on Systematic Approach to Systematic Analysis of New Technology Objects*. Kiev, Libid'. 288 p. (in Ukrainian).

10. **Timchenko, A. A.,** Podgorny, M. V., & Voyko, V. V. (2010) Investigation of Structures and Simulation of Processes for Control of Multimode Independently Operational Object. *Zbirnik Nauk. Prats' Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf. "Suchasni Informatsiini ta Innovatsiini Tekhnologii na Transporti MINTT-2010"* [Collection of Scientific Papers of International Scientific and Practical Conference "Modern Information and Innovative Technologies in Transport MINTT-2010"]. Kherson, 218–220 (in Ukrainian).

Поступила 30.05.2013

УДК 53.088.3

## НОВЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Аспиранты* **МОХАММЕД САЛЕМ А. А.<sup>1)</sup>, МЕЛЬНИКОВА Г. Б.<sup>2)</sup>,**  
*канд. физ.-мат. наук* **МАХАНЁК А. А.<sup>2)</sup>,**  
*акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф.* **ЧИЖИК С. А.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

E-mail: salimalkobati11@mail.ru

Точность определения модуля упругости методом атомно-силовой микроскопии в значительной степени зависит от качества обработки экспериментальных данных, получаемых при наноиндентировании. В условиях вибрационных помех многократно повторенная калибровка может давать заниженное значение калибровочного коэффициента. Подобный артефакт вызван проскальзыванием зонда по более твердой, чем у исследуемого образца, и неоднородной по высоте поверхности кремниевой пластинки. При обработке данных наноиндентирования на малых глубинах внедрения зонда в образец модуль упругости, вычисленный по модели Герца, зависит от величины внедрения. За искомый модуль принимают значение, близкое к асимптотическому, т. е. получаемое при достаточно большой деформации объекта. Такая деформация не всегда возможна в эксперименте, либо достигается при слишком больших (десятки процентов) относительных деформациях, т. е. за пределами допустимой области применения модели Герца.

Целью работы является демонстрация нескольких новых возможностей обработки данных наноиндентирования как на этапе получения или уточнения калибровочного коэффициента атомно-силового микроскопа, так и при анали-