

**ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА
В ДВС НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО СИГНАЛУ ИОННОГО ТОКА**

© 2017 А.Ю. Будко

Институт радиотехнических систем и управления
инженерно-технологической академии Южного федерального университета, г. Таганрог

Статья поступила в редакцию 07.11.2017

Статья посвящена вопросам разработки адаптивных методов управления двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на основе обратной связи по сигналу ионного тока. Приведен краткий обзор методов контроля и регулирования соотношения воздух/топливо и сформулирована цель исследования. Цель исследования заключается в разработке проблемно-ориентированной модели интегральной характеристики сигнала ионного тока и системы экстремального регулирования цикловой подачи топлива на ее основе, способной обеспечить возможность работы двигателя на заданном соотношении воздух/топливо в условиях параметрической неопределенности объекта управления. На основе анализа работ сторонних авторов, а также экспериментальных исследований, обоснована возможность применения сигнала ионного тока в системах управления топливоподачей ДВС для решения задачи поддержания заданного соотношения воздух/топливо по принципу экстремального регулирования. На основе аппроксимации экспериментальных данных получены функциональные зависимости интегральной характеристики сигнала ионного тока от коэффициента избытка воздуха для различных режимов работы двигателя. На основе полученных функциональных зависимостей и математического аппарата передаточных функций разработана и верифицирована проблемно-ориентированная математическая модель интегральной характеристики сигнала ионного тока. Разработанная математическая модель, с учетом влияния коэффициента избытка воздуха, позволяет учитывать следующие динамические и статические характеристики процесса сгорания топлива: задержку воспламенения, время выгорания топлива, динамику выгорания топлива, энергетику процесса сгорания. На основе разработанной математической модели в программе MATLAB построена имитационная модель системы экстремального регулирования цикловой подачи топлива с обратной связью по интегральной характеристике сигнала ионного тока. Результаты моделирования показывают, что разработанная система экстремального регулирования способна обеспечить работу ДВС в области естественного экстремума функции зависимости интеграла ионного тока от коэффициента избытка воздуха. Также показано, что применение метода введения фиктивного экстремума позволяет обеспечить работу двигателя на любом заданном отношении воздух/топливо в пределах воспламеняемости топливно-воздушной смеси.

Ключевые слова: Двигатель внутреннего сгорания, сигнал ионного тока, система экстремального регулирования, численное моделирование.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00025**«Новые методы анализа ионных токов как инструмент исследования и оптимизации работы ДВС».***ВВЕДЕНИЕ**

Задача контроля качественного состава топливно-воздушной смеси (ТВС) по сигналу ионного тока (СИТ) является актуальной в связи с высоким влиянием этого параметра на эксплуатационные параметры ДВС. Это подтверждается большим числом отечественных и зарубежных публикаций по данной тематике [1–10]. В работах [1, 2] показано наличие зависимости амплитуды пиков СИТ от соотношения воздух/топливо (В/Т) (рис. 1, а), при этом в работе [2] предлагается алгоритм контроля качества ТВС

Будко Артем Юрьевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры электротехники и мехатроники, руководитель образовательной программы прикладного бакалавриата по специальности «Мехатроника и робототехника». E-mail: abudko@sfedu.ru

с обратной связью по ионному току. Однако в работе [1] не рассматриваются вопросы разработки систем управления топливоподачей по СИТ, а эксперименты в работе [2] проведены на сферической бомбе, что затрудняет перенос научных результатов в области управления соотношения В/Т на ДВС. В работах [3, 4] показана возможность робастной оценки соотношения воздух/топливо с использованием СИТ и искусственных нейронных сетей (ИНС), однако задача оптимизации управляющих воздействий по полученным данным не решается. Кроме того, несмотря на то, что ИНС хорошо подходит для обработки СИТ, для получения приемлемой точности традиционные реализации ИНС могут требовать ресурсов обработки, превышающих возможности существующих контроллеров двигателя, следовательно, вопрос разработки

наблюдателей параметров сгорания по СИТ для применения в системах реального времени остается открытым. Вопросам контроля и управления соотношением В/Т в цилиндрах ДВС в режиме реального времени посвящены работы [5–8]. В работах [5] и [6] рассматривается возможность контроля соотношения В/Т в одноцилиндровом двигателе на метановом или пропановом топливе, причем в работе [5] для определения текущего значения соотношения В/Т используется площадь под пиком термической ионизации СИТ (рис. 1, б).

Возможность контроля соотношения В/Т на инжекторном (впрысковом) бензиновом двигателе показана в работах [7, 8], при этом в работе [7], как и в работе [5], для оценки текущего значения соотношения В/Т используются только параметры пика тепловой ионизации СИТ, а именно усредненное значение сигнала. В работе [8] областью исследования являлось влияние на соотношение В/Т, параметры СИТ и эксплуатационные параметры двигателя количества рециркулируемых отработавших газов, при этом в качестве оцениваемых параметров СИТ выбрана амплитуда пика термической ионизации и площадь СИТ.

Из вышесказанного следует, что, несмотря на значительный задел в исследуемой области, остается ряд нерешенных задач, связанных с практическим применением систем данного класса. Целью настоящей работы является разработка проблемно-ориентированной модели интегральной характеристики СИТ и системы экстремального регулирования (СЭР) цикловой подачи топлива на ее основе, способной обеспечить возможность работы двигателя на заданном соотношении воздух/топливо в условиях параметрической неопределенности объекта управления.

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВС ПО СИГНАЛУ ИОННОГО ТОКА

Двигатель внутреннего сгорания по своей природе имеет экстремальный характер зависимостей своих внешних показателей от управляющих воздействий и режимов работы. Анализ работ [1–10], а также данных, приведенных на (рис. 1, а, б), показывает, что зависимости параметров СИТ от состава ТВС также имеют экстремальный характер, что указывает на возможность построения СЭР цикловой подачи топлива на основе обратной связи по СИТ. Более наглядно экстремальный характер зависимости параметров СИТ от состава ТВС и ее взаимосвязь с максимальным давлением в цилиндре двигателя за цикл сгорания показана в работах [9,10] (рис. 2).

Анализ данных (рис. 2), указывает на то, что работа ДВС на составе ТВС в области экстремума функции интеграла СИТ позволяет получить максимальное давление в цилиндре двигателя, что соответствует мощностному режиму работы ДВС. Как будет показано ниже, экстремальное регулирование с использованием обратной связи по СИТ позволяет также обеспечить работу ДВС и на других заданных составах ТВС, соответствующих диапазону пределов воспламеняемости и режимов работы двигателя.

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА ИОННОГО ТОКА

Для реализации СЭР необходимо получение математической модели объекта управления или

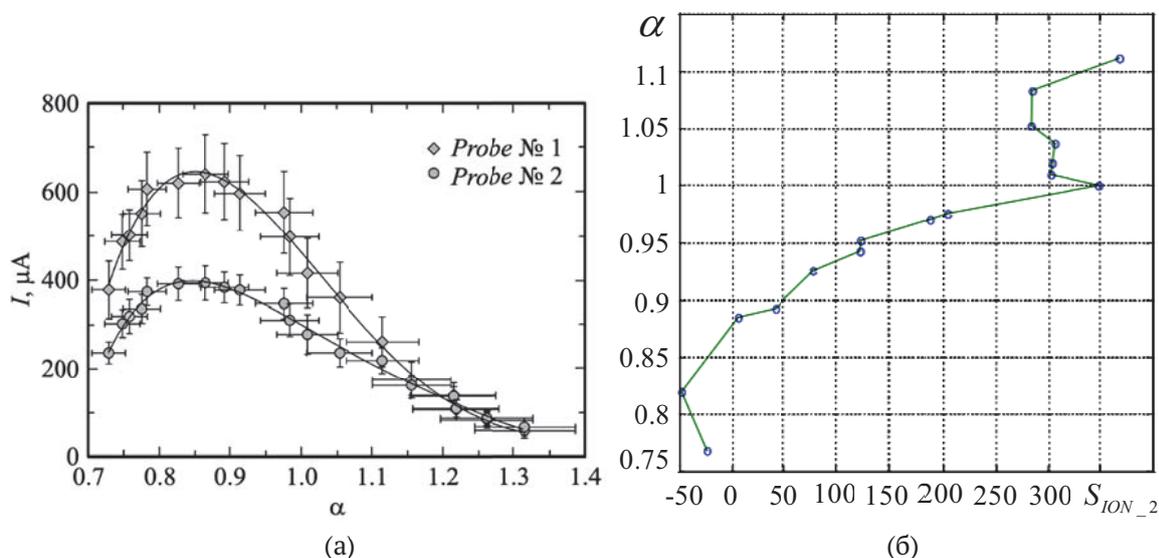


Рис. 1. Зависимости параметров ионного тока от соотношения воздух/топливо:

(а) – амплитуды пика химической ионизации ионного тока, (б) – площади под пиком термической ионизации

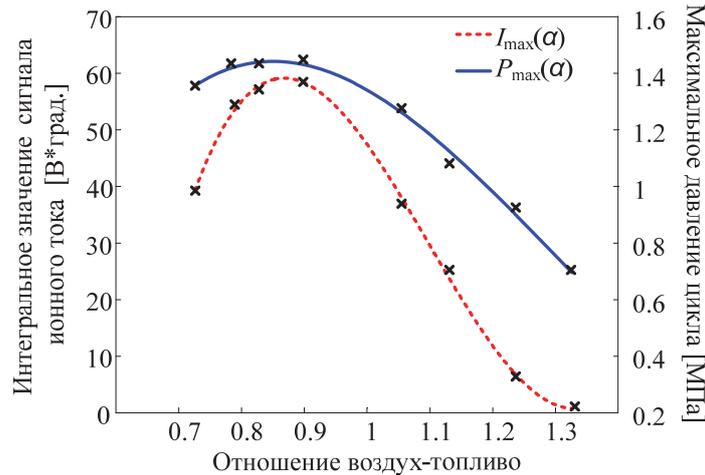


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха α на максимальное давление цикла P_{max} и полный ток на зонд за цикл I_{max}

процесса, от которого зависит эффективность его работы. Рассмотрим в качестве такого процесса процесс ионизации топливного заряда во время его сгорания. Процесс ионизации можно разделить на фазы химической и термической ионизации, с различными доминирующими механизмами ионообразования [11–17]. Анализ СИТ с позиций различных фаз ионизации зачастую осуществляется структурными или параметрическими методами [11–13]. Однако, в реальных условиях работы ДВС, такой анализ затруднен в связи с высокой цикловой нестабильностью СИТ, обусловленной его высокой чувствительностью к параметрам сгорания ДВС [13–17].

Для описания динамических и статических характеристик процесса ионизации рабочего заряда в результате выгорания ТВС воспользуемся понятием интегральной характеристики СИТ [9, 10]. В физическом смысле интегральная характеристика СИТ является величиной, отображающей энергетику процесса сгорания, поскольку величина ионного тока в основном зависит от интенсивности химических реакций, давления и температуры. Этим объясняется высокая корреляция между давлением и интегралом ионного тока (рис. 2), а также существенный амплитуды ионного тока при добавках водорода в ТВС [18–20].

Использование интегральной характеристики сигнала ионного тока позволяет снизить влияние межцикловых вариации на результаты расчетов, приближая разброс расчетных показателей к аналогичному разбросу показаний пьезокерамических датчиков давления сгорания [9, 10]. Интегральная характеристика сигнала ионного тока представляет собой кривую (рис. 3), полученную методом пошагового интегрирования сигнала ионного тока во временной области или в функции угла поворота коленчатого вала [9, 10], в соответствии с выражением (1):

$$I_{ION}(t) = \int_{t_1}^{t_2} U_{ION}(t) dt, \quad (1)$$

где $I_{ION}(t)$ – интегральная характеристика ионного тока [В*с], t – время [с], t_1 и t_2 – пределы интегрирования [с], $U_{ION}(t)$ – показания датчика ионизации, [В].

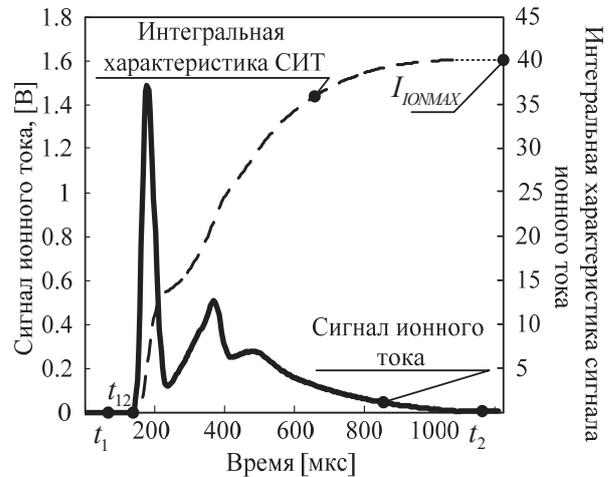


Рис. 3. Пример сигнала ионного тока и его интегральной характеристики

На (рис. 3) момент времени t_1 соответствует моменту зажигания топливной смеси (УОЗ), период $T_z = t_{12} - t_1$ характеризует задержку воспламенения, а период $t_2 - t_1$ соответствует длительности сгорания.

Для описания динамики развития кривой интегральной характеристики СИТ во времени используем математический аппарат передаточных функций. Процесс управления сгоранием ТВС посредством изменения цикловой подачи топлива можно представить в виде дискретной процедуры, в ходе которой на вход объекта управления подаются ступенчатые воздействия, определяемые сгоранием за единичный

цикл поступившего в цилиндр топливного заряда, имеющего определенные количественные и качественные характеристики. При этом входной переменной объекта управления будет являться коэффициент избытка воздуха α , определяемый соотношением долей топлива и окислителя, а выходной переменной – интеграл СИТ $I_{IONMAX}(\alpha)$.

Выражение на основе передаточной функции аperiodического звена первого порядка, описывающее кривую интегральной характеристики СИТ с учетом энергетики процесса сгорания, задержки воспламенения и динамики выгорания топлива, запишем в виде (2):

$$W_{IONMAX}(s) = \frac{K_{IONMAX} e^{T_z s}}{T_0 s + 1}, \quad (2)$$

где K_{IONMAX} – коэффициент, характеризующий энергетику процесса сгорания и определяемый интегралом ионного тока I_{IONMAX} (рис. 3); T_0 – постоянная времени, определяющая динамику выгорания топлива; T_z – время чистого запаздывания звена, характеризующее задержку воспламенения топливного заряда и равное периоду $T_z = t_{12} - t_1$ (рис. 3).

Таким образом, выражение (2) описывает семейство интегральных характеристик СИТ, характеризуемых разными энергетическими показателями, динамикой выгорания топлива и

задержками воспламенения, которые зависят от количества и качества ТВС.

Для идентификации параметров выражения (2) используем семейство интегральных характеристик СИТ, экспериментально полученных для разных значений α (рис. 4, а, б). Данные для анализа получены в Тольяттинском государственном университете, подробное описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента приведены в [1].

В процессе идентификации производилась аппроксимация экспериментальных кривых выражением (2) по методу наименьших квадратов. В результате были установлены значения параметров выражения (2), позволяющие описать интегральные характеристики СИТ (рис. 4) в исследованном диапазоне $\alpha \in [0.775...1.334]$, (табл. 1).

Диапазон изменения коэффициента K_{IONMAX} составил $K_{IONMAX} \in [9...63]$, диапазон изменения времени запаздывания составил $T_z \in [50...300]$ мкс, постоянная времени $T_0 = 800$ мкс.

На (рис. 5) приведено семейство экспериментально полученных интегральных характеристик СИТ и соответствующие им модельные кривые, рассчитанные по выражению (2) с параметрами (табл. 1).

Анализ данных (рис. 5) позволяет заключить, что выражение (2) подходит для описания

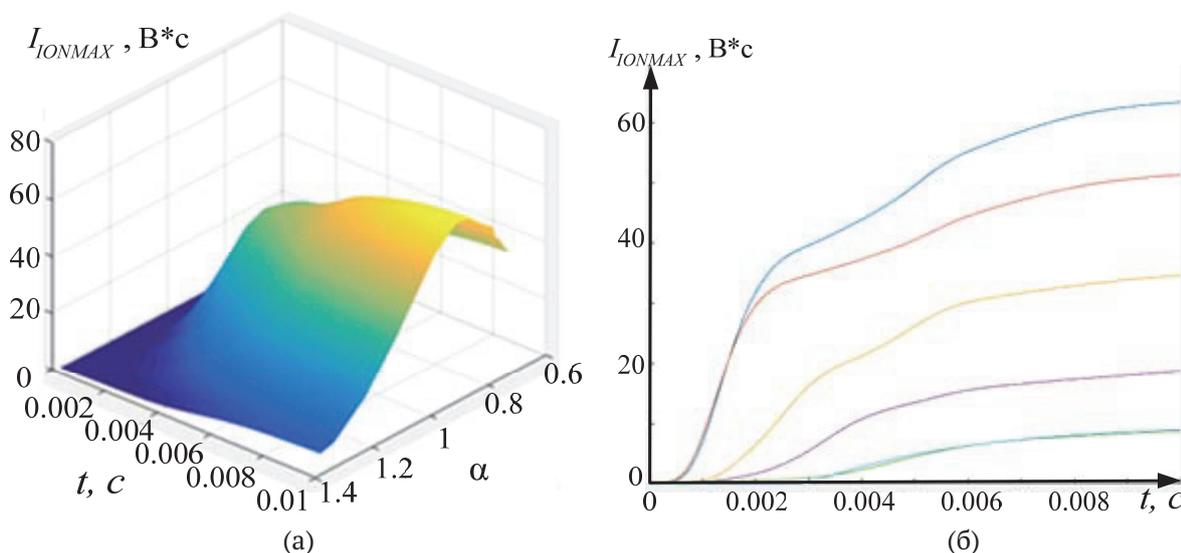


Рис. 4. Семейство экспериментальных интегральных характеристик СИТ, полученных для разных значений соотношения воздух/топливо α в координатах: (а) – время–коэффициент избытка воздуха–интеграл ионного тока (t - α - I_{IONMAX}); (б) – время–интеграл ионного тока (t - I_{IONMAX})

Таблица 1. Расчетные коэффициенты математической модели интегральной характеристики, полученные для экспериментальных данных

Параметр	$\alpha=0.775$	$\alpha=0.911$	$\alpha=0.979$	$\alpha=1.115$	$\alpha=1.225$	$\alpha=1.334$
K_{IONMAX}	53	63	57	36	18	9
$T_z, \text{мкс}$	50	50	50	80	150	300

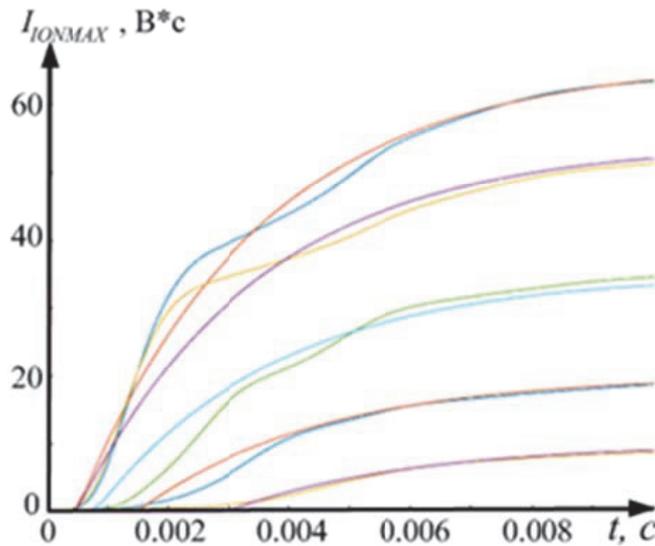


Рис. 5. Семейство экспериментальных и соответствующих им модельных кривых интегральных характеристик ионного тока

семейства интегральных характеристик СИТ в исследованном диапазоне α .

Для задания статической характеристики модели интегральной характеристики СИТ была произведена аппроксимация зависимости $I_{IONMAX}(\alpha)$, построенной по экспериментальным данным (рис. 4, а, б) по методу наименьших квадратов. Рассмотрим примеры аппроксимации зависимости $I_{IONMAX}(\alpha)$ полиномами второго (рис. 6, а) и третьего (рис. 6, б) порядка.

Анализ данных (рис. 6, а, б) и показателей качества аппроксимации (табл. 2), указывает на несущественную разницу в качестве аппрокси-

мации зависимости $I_{IONMAX}(\alpha)$ в области экстремума полиномами второго и третьего порядков, поэтому, руководствуясь меньшей ресурсоемкостью, выберем полином второго порядка.

Таким образом, статическую характеристику модели интегральной характеристики СИТ в общем виде запишем как (3):

$$I_{IONMAX}(\alpha) = p_1 \cdot \alpha^2 + p_2 \cdot \alpha + p_3, \quad (3)$$

где p_1, p_2 и p_3 – коэффициенты полинома.

В данной работе в процессе идентификации были получены следующие значения коэффициентов полинома (3): $p_1 = -641,9, p_2 = 1158, p_3 = -457,1$.

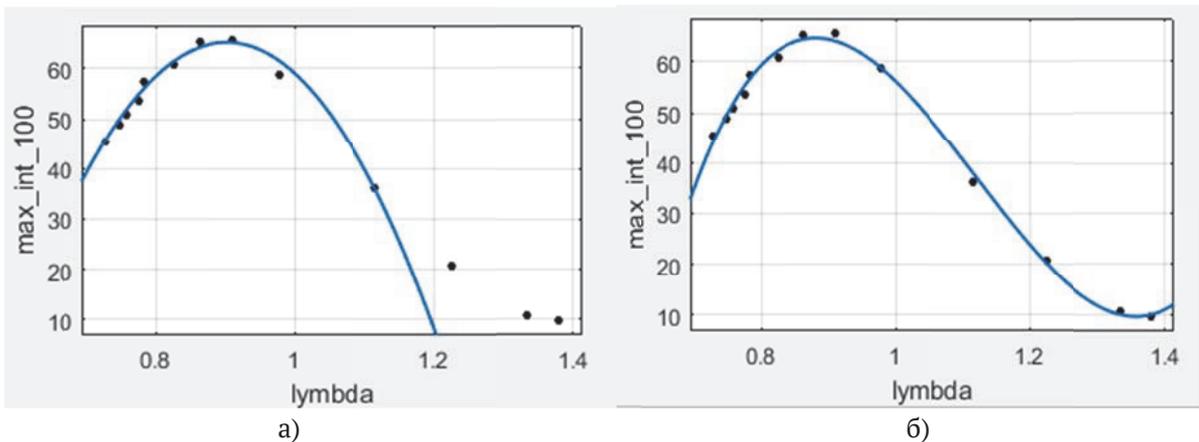


Рис. 6. Примеры аппроксимации зависимости I_{IONMAX} (а): (а) – полиномом второго порядка, (б) – полиномом третьего порядка

Таблица 2. Показатели качества аппроксимации

Показатель качества аппроксимации	Полином второго порядка	Полином третьего порядка
Сумма квадратов ошибок	12.69	16.26
Квадрат смешанной корреляции	0.9834	0.9965
Уточненный R-квадрат	0.9787	0.9953
Корень из среднего для квадрата ошибки	1.346	1.344

Найдем экстремум функции (3), для этого запишем ее производную в виде (4):

$$I_{IONMAX}'(\alpha) = 2p_1 \cdot \alpha + p_2, \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что производная функции $I_{IONMAX}'(\alpha) = 0$ при $\alpha = -p_2/2p_1$, таким образом, подставляя найденные ранее коэффициенты полинома (3) p_1 и p_2 получим расчетное значение $\alpha = -1158/2 \cdot -641,9 = 0.903$, соответствующее экстремуму статической характеристики (3).

Следует отметить, что положение статической характеристики (3) под влиянием возмущений может изменяться по вертикали с сохранением экстремума в области $\alpha \in [0.85...0.95]$, что связано с изменением количества ТВС поступившей в цилиндр и общим изменением энергетики сгорания в связи с этим. Для учета этих свойств реального объекта управления введем в модель интегральной характеристики СИТ (2) коэффициент k_V . Учитывая, что K_{IONMAX} выражения (2) определяется значением $I_{IONMAX}(\alpha)$ выражения (3), а также вводя коэффициент k_V в выражение (2) запишем (5):

$$W_{IONMAX}(s, \alpha) = \frac{(p_1 \times \alpha^2 + p_2 \times \alpha + p_3)k_V e^{T_0 s}}{T_0 s + 1}. \quad (5)$$

Как отмечалось выше, значение коэффициента k_V выбирается исходя из зависимости интеграла СИТ от количества поступившей ТВС.

В данной работе, при моделировании, зависимость интеграла СИТ от количества поступившей ТВС принята линейной в условиях квазистационарности объекта управления на малых отрезках времени регулирования (6):

$$I_{IONMAX}(k_V) = I_{IONMAX} \times k_V. \quad (6)$$

При этом пределы изменения коэффициента k_V в данной работе выбраны $k_V \in [0.05...1]$, что соответствует 5-100% максимально возможного количества ТВС. Семейство статических характеристик модели ионизации ТВС (5), соответ-

ствующее различным значениям коэффициента k_V представлено на (рис. 7).

Построим в среде моделирования «Simulink» программного пакета «Matlab» модель интегральной характеристики СИТ (5) (рис. 8).

На (рис. 8) вход «In1» модели служит для ввода в модель значения коэффициента избытка воздуха а топливного заряда, вход «In2» предназначен для ввода значения коэффициента k_V , отвечающего за дрейф статической характеристики в результате изменения количества подаваемого топливного заряда.

Выход модели интегральной характеристики СИТ при неизменном количестве подаваемой ТВС и различных коэффициентах избытка воздуха а представлен (рис. 9).

На (рис. 9) значения коэффициента избытка воздуха а приняты равным экспериментальным (табл. 1) и для наглядности масштабированы в масштабе 10:1. Следует отметить, что в резуль-

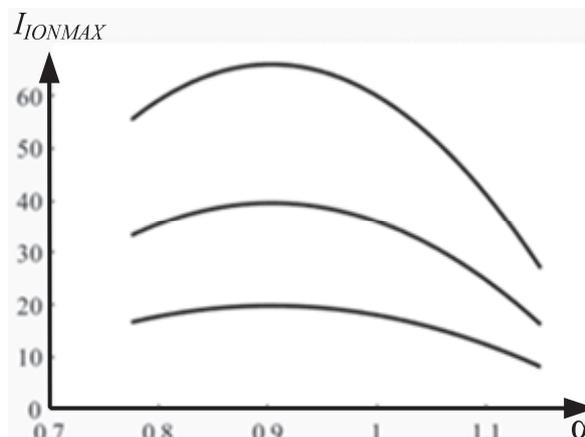


Рис. 7. Статические характеристики модели ионного тока, соответствующее различным значениям коэффициента k_V : верхняя линия – $k_V=1$, средняя линия – $k_V=0,6$, нижняя линия – $k_V=0,3$

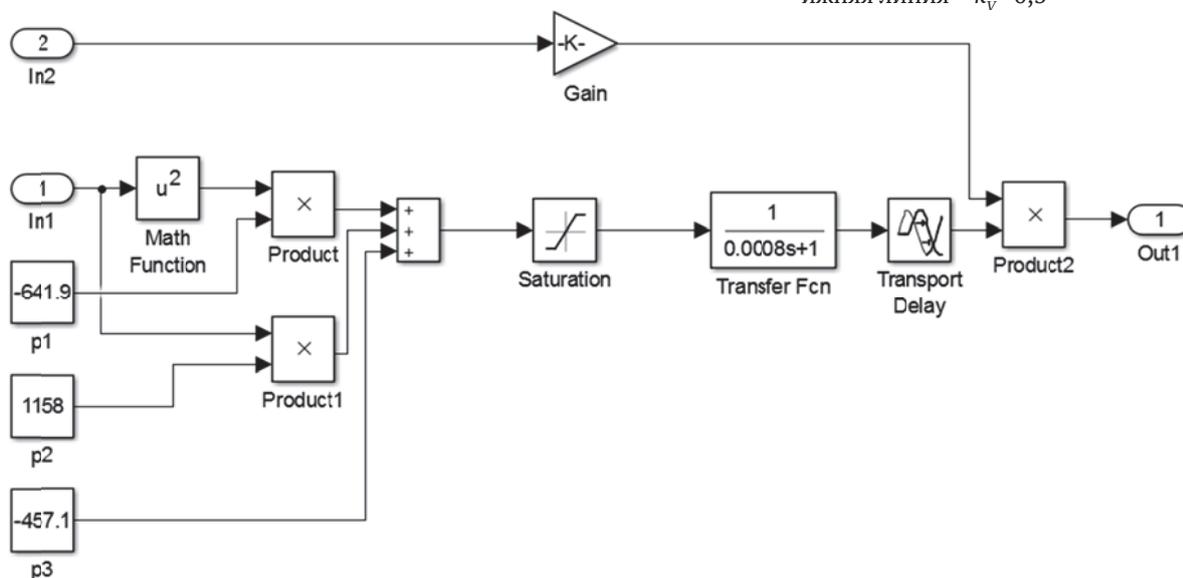


Рис. 8. Модель интегральной характеристики сигнала ионного тока среде моделирования «Simulink»

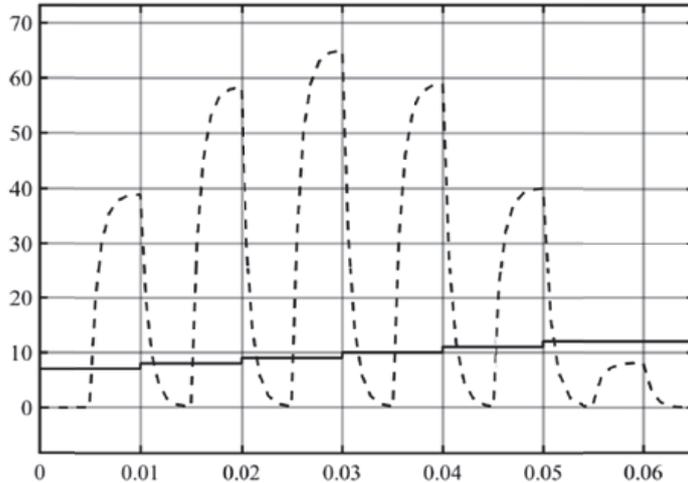


Рис. 9. Выход модели интегральной характеристики сигнала ионного тока (прерывистая линия) при различных коэффициентах избытка воздуха α (сплошная линия)

тате верификации, форма кривой выхода модели соответствует форме интегральных характеристик экспериментально полученного СИТ, а значение выхода в конце модельного цикла сгорания соответствует значению интеграла экспериментального СИТ за цикл для исследованного диапазона коэффициента избытка воздуха α .

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОВОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ИНТЕГРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ СИГНАЛА ИОННОГО ТОКА

За показатель качества процесса сгорания примем интеграл ионного тока на зонд за цикл, в качестве регулируемого параметра – соотношение В/Т, в качестве управляющего воздействия – цикловую подачу топлива. Для моделирования формирования топливного заряда с различным соотношением (В/Т) и различными

количественными характеристиками используем модель формирования топливного заряда на основе формулы расчета коэффициента избытка воздуха (7):

$$\alpha = \frac{G_{AIR}/G_{FUEL}}{\left(G_{AIR}/G_{FUEL}\right)_{ST}}, \quad (7)$$

где G_{AIR} – массовая доля воздуха, G_{FUEL} – массовая доля окислителя, а индекс ST относится к стехиометрической смеси.

Модель формирования топливного заряда при стехиометрическом соотношении В/Т $\alpha_{ST}=14,7/1$ приведена на (рис. 10).

Вход «Air Drift In» модели (рис. 10) предназначен для ввода возмущений, связанных с изменением расхода воздуха, а вход «Fuel Regulator In» предназначен для ввода в модель корректирующего топливоподачу сигнала обратной связи с регулятора цикловой подачи топлива.

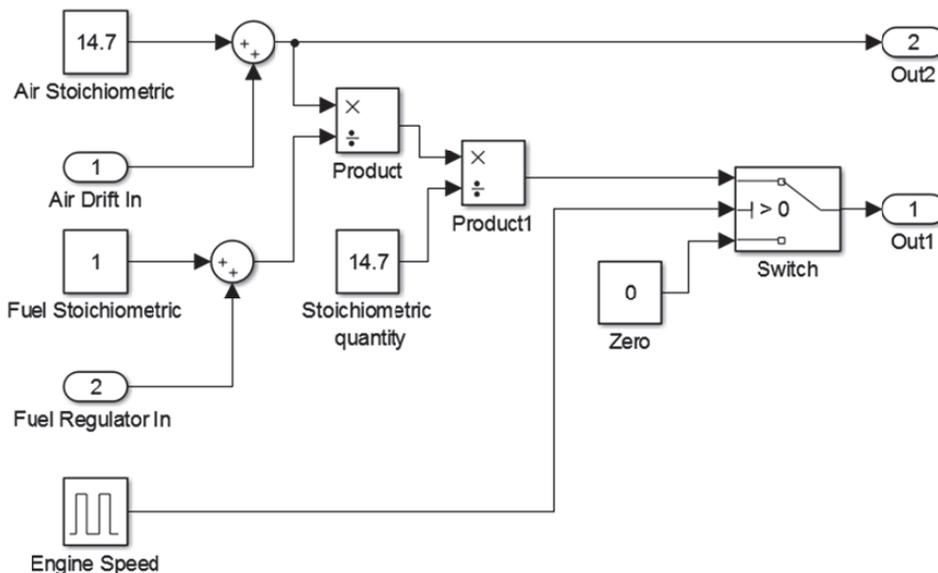


Рис. 10. Модель формирования топливного заряда в среде моделирования «Simulink»

Блок «Engine Speed» предназначен для задания частоты чередования управляющих импульсов, что позволяет имитировать различные обороты двигателя. Выход «Out1» предназначен для вывода расчетного значения коэффициента избытка воздуха α , а выход «Out2» – количественной характеристики топливного заряда.

Поскольку точка экстремума статической характеристики модели (рис. 7) меняется в зависимости от внешних возмущений и управляющих воздействий, а сам экстремум является ярко выраженным, то является оправданным создание системы регулирования экстремального типа. При этом на устоявшихся режимах работы ДВС параметры внешних и внутренних возмущений объекта регулирования примем квазистационарным в сравнении с быстродействием контура экстремального регулирования.

Регулятор цикловой подачи топлива построим по схеме шаговой СЭР с предвычислением статической характеристики в процессе поиска экстремума [21]. Схема разработанного регулятора приведена на (рис. 11).

Общая структура разработанной имитационной модели СЭР приведена на (рис. 12).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для пояснения работы разработанной СЭР цикловой подачи топлива рассмотрим пример ее работы (рис. 13, а, б, в), где графики (рис. 13, а, б, в) соответствуют входам блока «Score» (рис. 12).

На (рис. 13) модель СЭР обрабатывает изменение подачи топлива при скачкообразном изменении количества поступающего воздуха (рис. 13, а). В период времени $t \in [0...0.17]$ модельного времени система выходит на мак-

симум статической характеристики (3) интегральной характеристики СИТ (рис. 13, б) при заданном неизменном расходе воздуха 14.7 единиц, вследствие чего расход топлива дискретно нарастает (рис. 13, в) до достижения экстремума статической характеристики (3), т.е. установления коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 0,9$. В период модельного времени $t \in [0.17...0.3]$ происходит работа регулятора в области экстремума, вокруг которого устанавливаются автоколебания выхода регулятора топлива (рис.13, в). В момент времени $t = 0.3$ происходит скачкообразный рост расхода воздуха на 3 единицы (рис.13, а). После этого регулятор производит коррекцию подачи топлива в сторону увеличения на 0.21 единицу в течении периода времени $t \in [0.3...0.5]$, что характеризуется ростом кривой графика (рис.13, в) коррекции подачи топлива, пока значение интегральной характеристики СИТ не достигает нового экстремума статической характеристики в момент времени $t = 0.5$, что характеризуется повторным установлением автоколебаний регулятора подачи топлива на новом уровне. Следует отметить, что новое установившееся значение интегральной характеристики ионного тока (рис. 13, б) больше предыдущего, что говорит о корректной отработке дрейфа статической характеристики в результате увеличения количества топливного заряда, вызванного увеличенным расходом воздуха и топлива.

В целях оптимизации работы двигателя на различных режимах может потребоваться обеспечение качественного состава ТВС с коэффициентом избытка воздуха α отличным от $\alpha = 0.903$, соответствующего естественному экстремуму статической характеристики (3). Примеры таких режимов приведены на (рис. 14) [22].

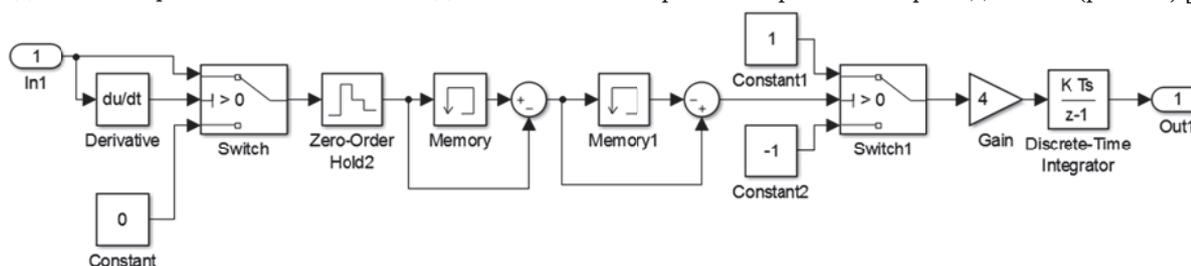


Рис. 11. Регулятор цикловой подачи топлива в среде моделирования «Simulink»

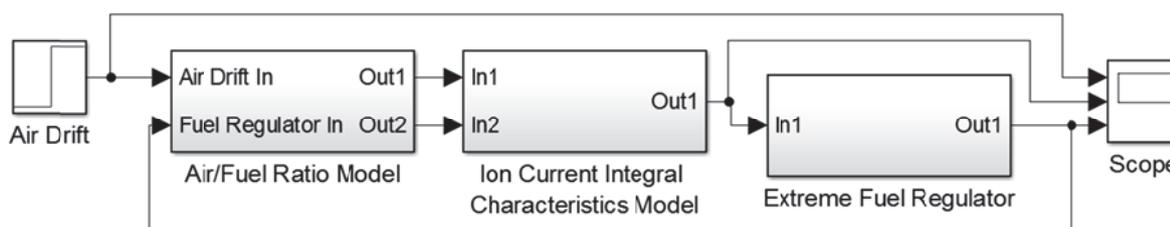
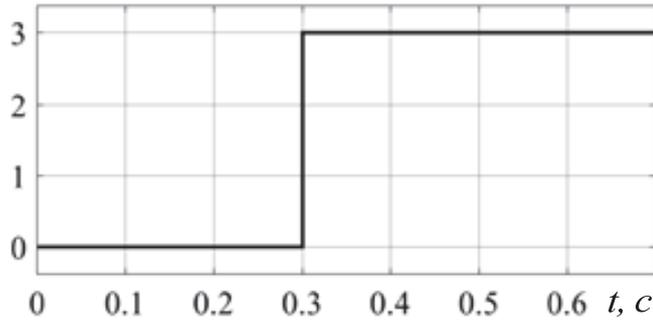
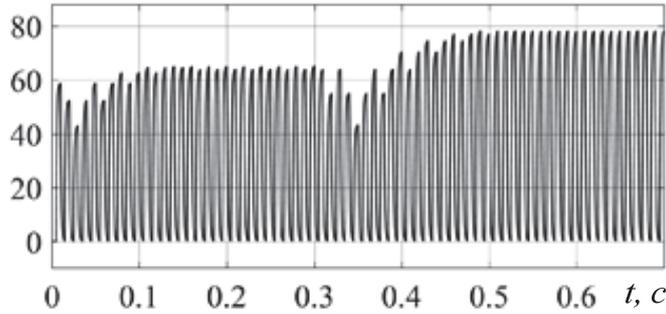


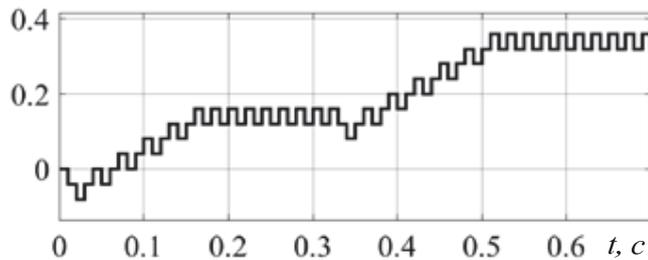
Рис. 12. Общая структура разработанной имитационной модели системы экстремального регулирования цикловой подачи топлива с обратной связью по интегральной характеристике сигнала ионного тока



(а)



(б)



(в)

Рис. 13. Пример работы системы экстремального регулирования подачи топлива с обратной связью по интегральной характеристике сигнала ионного тока:
 (а) – расход воздуха, (б) – выход модели интегральной характеристики сигнала ионного тока,
 (в) – выход регулятора цикловой подачи топлива



Рис. 14. Регулировочная характеристика ДВС по составу смеси

Для смещения рабочей точки регулятора на заданный коэффициент избытка воздуха а применим метод введения фиктивного экстремума [21]. Для этого входной сигнал регулятора преобразуется посредством сложения функции, описывающей статическую характеристику объекта управления (3) с функцией описываемой выражением (8):

$$y_1(\alpha) = p_{11}\alpha + p_{21}, \quad (8)$$

где p_{11} и p_{21} – коэффициенты полинома первой степени, выбираемые в зависимости от вида желаемой результирующей характеристики объекта управления.

Примеры естественной и видоизмененной статических характеристик модели интегральной характеристики СИТ приведены на рис. 15.

Анализ данных (рис. 15) показывает, что представленная СЭР, посредством метода введения фиктивного экстремума, способна обеспечить работу ДВС на любом заданном отношении В/Т.

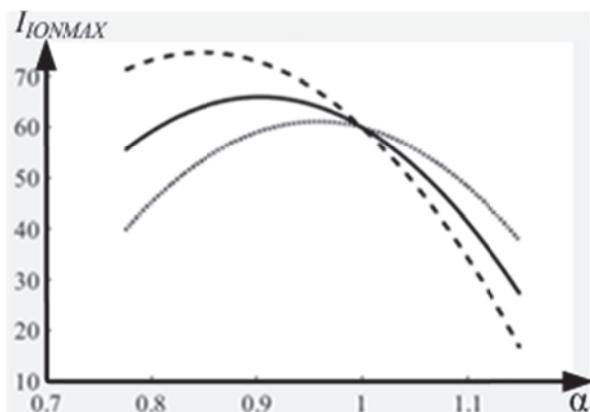


Рис. 15. Примеры естественной и видоизмененной статических характеристик модели интегральной характеристики ионного тока: штриховая линия – смещение в сторону богатых смесей, сплошная линия – естественная характеристика, пунктирная линия – смещение в сторону бедных смесей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показана возможность регулирования цикловой подачи топлива на основе СЭР с обратной связью по ионному току. В качестве показателя качества работы объекта управления выбрана интегральная характеристика СИТ, характеризующая энергетику процесса сгорания и коррелирующая с максимальным давлением в цилиндре двигателя за цикл сгорания. В качестве регулируемого параметра принято соотношение воздух/топливо. Разработана и верифицирована проблемно-ориентированная модель интегральной характеристики СИТ. В программе MATLAB разработана имитационная модель СЭР топливоподачи на основе предложенной модели ионизации топливного заряда в процессе сгорания. Результаты моделирования разработанной СЭР цикловой подачи топлива указывают на то, что на данном принципе может быть обеспечена работа двигателя на смеси с заданным коэффициентом избытка воздуха в условиях параметрической неопределенности объекта управления. В виду сложности организации поиска экстремума на переходных режимах, предпочтительным применением разработанной СЭР является управление ДВС, большую часть времени работающих на установившихся режимах, либо в условиях переходных режимов с большой постоянной времени. Предлагаемая СЭР может быть рекомендована для управления ДВС, работающих в составе электрогенераторных станций, судовых двигателей, двигателей железнодорожных составов, авиационных поршневых двигателей и ходовых двигателей наземных транспортных средств дальнего действия, в работе которых преобладают установившиеся режимы. Применение СЭР с обрат-

ной связью по параметрам процесса сгорания в каждом цилиндре двигателя может обеспечить более точную настройку коэффициента избытка воздуха, оптимального для заданного режима работы двигателя и повысить эффективность работы ДВС как технической системы в целом. Дальнейшей задачей исследования является исследование динамических свойств и устойчивости предлагаемого регулятора, а также проведение эксперимента по регулированию топливоподачи на основе СИТ в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясников И.С., Ивашин П.В., Шайкин А.П. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме // Журнал технической физики. 2013. Том 83. Вып. 11. С. 39–43.
2. Reinmann R., Satzkoff A., Mauss F. Local AFR measurements using the spark plug as an ionization sensor. SAE paper 970856. 1997. pp. 1224–1234.
3. Estimating pressure peak position and AFR using the ionization current and artificial neural networks / Wickstrom N., Taveniku M., Linde A., Larsson M., Svensson B. // In Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent transportation systems, November 1997. 1998. pp. 972–977.
4. Robust AFR estimation using the ion current and neural networks / Rognvaldsson T., Golunski S. E., Carlsson C., Hellring M., Reinkingh J., Larsson M., Munther T., Wickstrom N. // SAE paper 1999-01-1161. 1999. pp. 1585–1589.
5. Upadhyay D., Rizzoni G. AFR control on a single cylinder engine using the ionization current // SAE paper 980203. 1998. pp. 392–399.
6. Schneider D., Lai M.-C. D. Real-time air/fuel control in a small engine using the ionic current signal // SAE paper 1999-01-3323. 1999. pp. 2012–2020.
7. Filipek P. Estimating air-fuel mixture composition in the fuel injection control process in an SI engine using ionization signal in the combustion chamber // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. 2013. 15 (3): 259–265.
8. Einewall P., Tunestål P., & Johansson B. The Potential of Using the Ion-Current Signal for Optimizing Engine Stability - Comparisons of Lean and EGR (Stoichiometric) Operation // In SAE Special Publications. Vol. 2003, pp. 191–202.
9. Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока / А.Ю. Будко, М.Ю. Медведев, Р.Ю. Будко, П.В. Ивашин, А.Я. Твердохлебов, Д.Н. Герасимов, В.В. Рахманов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т.18. №4. С.256–263.
10. Analysis of Ion Current Integral Characteristics for Estimation of Combustion Process Parameters in Internal Combustion Engines / Artem Yu. Budko, Michail Yu. Medvedev, Raisa Yu. Budko, Pavel V. Ivashin, Andrey Ya. Tverdokhlebov, Dmitriy N. Gerasimov, and Vitaly V. Rakhmanov // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2017. Vol. 6. No. 3. pp. 188–193.
11. Saitzkoff A., Reinmann R., Mauss F. In-Cylinder

- Pressure Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor // SAE paper 970857 (1997).
12. *Lars Eriksson*. Spark Advance Modeling and Control // Linköping. 1999. SE-581 83.
 13. *Gao Z. et al.* 2014. The correlation between the cylinder pressure and the ion current fitted with a Gaussian algorithm for a spark ignition engine fuelled with natural-gas–hydrogen blends. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.
 14. *Axel Franke*. Characterization of an Electrical Sensor for Combustion Diagnostics // Doctoral Thesis. 2002. Lund Reports on Combustion Physics. LRCP-80 ISSN 1102-8718.
 15. *Kaiadi M. et al.* Closed-Loop Combustion Control Using Ion-Current Signals in a 6-Cylinder Port-Injected Natural-gas Engine // 2008. SAE 2008-01-2453.
 16. *Zheng S. et al.* Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine // Inter-national conference on electronic and mechanical engineering and information technology, Harbin, Heilongjiang, People's Republic of China. 2011. New York: IEEE. pp. 3404-3407.
 17. *Wu X. et al.* Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion // Energy and Fuels. 2008. vol. 22. pp. 2941-2947.
 18. *Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р.* Влияние скорости распространения и ионизации пламени на концентрацию несгоревших углеводородов в газовом ДВС // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4. С. 248-252.
 19. *Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р.* Взаимосвязь ионного тока с концентрацией углерода в топливе и видимой скоростью распространения пламени // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. Т. 1. № 3 (21). С. 69-74.
 20. *Судоргин Н.И., Шайкин А.П., Ивашин П.В.* Влияние добавки водорода в топливовоздушную смесь на максимальное давление сгорания в двигатели с искровым зажиганием // В сборнике: Транспорт. Экономика. Социальная сфера. (Актуальные проблемы и их решения) сборник статей Международной научно-практической конференции. 2014. С. 136-140.
 21. *Либерзон Л.М., Родов А.Б.* Системы экстремального регулирования [под ред. В.В. Казакевича]. М.: Энергия. 1965.
 22. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / *В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.* Учебник для вузов [под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова]. 4-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2010. 479 с.

ION CURRENT FEEDBACK EXTREME REGULATION OF CYCLE FUEL SUPPLY IN THE IC ENGINE

© 2017 A.Yu. Budko

Institute of Radio Engineering and Control
of the Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University, Taganrog

The article is focused on the development of ion current feedback based adaptive control methods for internal combustion engine (ICE). A brief overview of the methods of the air / fuel ratio regulation and the purpose of the research are given. The aim of the research is to develop a problem-oriented model of the integrated characteristic of the ion current signal and an extreme regulation system for cyclic fuel supply based on it, capable of enabling the engine to function at a predetermined air / fuel ratio under conditions of parametric uncertainty in the control object. Based on the analysis of the work of third-party authors, as well as experimental studies, the possibility of using the ion current signal in the fuel management systems of an ICE is proved to solve the problem of maintaining a given air / fuel ratio by the principle of extreme regulation. The functional dependences of the integrated characteristic of the ion current signal vs. excess air coefficient for various IC engine operating modes have been obtained using approximation of the experimental data. Based on the dependencies above and the transfer functions, the problem-oriented mathematical model of the integrated characteristic of the ion current signal was developed and verified. The developed mathematical model with effect of the excess air factor takes into account the following dynamic and static characteristics of the combustion process: ignition delay, fuel burn-up time, fuel burned dynamics, combustion energy. The simulation model of the system of the ion current integrated characteristic feedback based extreme regulation of the cyclic fuel supply is released in MATLAB. The simulation results show that the developed system of extreme regulation is capable of ensuring the operation of internal combustion engines in the region of natural extremum of the function of the ion current integral as a function of the excess air coefficient. It is also shown that the application of the method of introducing a fictitious extremum allows the engine to operate at any given air / fuel ratio within the flammability of the fuel-air mixture.

Keywords: Internal combustion engine, ion current signal, extreme control system, computer simulation.

Artem Budko, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Head of the Educational Bachelor Program in the Specialty «Mechatronics and Robotics». E-mail: abudko@sfnu.ru