

УДК 519.711.3-62.40

## АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КРУТЯЩИМ МОМЕНТОМ ИНЖЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д.Н. Герасимов<sup>а</sup>, М.В. Лызлова<sup>а</sup>, Ф.Л. Могилевцев<sup>а</sup>, В.О. Никифоров<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: [mogfl@yandex.ru](mailto:mogfl@yandex.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 14.05.15, принята к печати 05.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-623-631

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Герасимов Д.Н., Лызлова М.В., Могилевцев Ф.Л., Никифоров В.О. Алгоритм адаптивного управления крутящим моментом инжекторного двигателя внутреннего сгорания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 623–631.

### Аннотация

**Предмет исследования.** Двигатель внутреннего сгорания как объект управления является сложной существенно нелинейной системой, работающей, как правило, в динамических режимах в условиях действия возмущений. В силу сложности конструкции и многорежимности работы двигателя ряд его характеристик и параметров неизвестны или неточно известны. В этих условиях задача управления моментом представляется нетривиальной и требует применения современных методов управления, позволяющих парировать указанные особенности. В работе предлагается сравнительно простой алгоритм адаптивного управления крутящим моментом инжекторного двигателя. **Метод.** Отличие предлагаемого метода управления моментом заключается в том, что в его основе лежит нелинейная динамическая модель, содержащая параметрические и функциональные неопределенности (статические характеристики), которые подавляются при помощи алгоритма адаптивного управления с единственным настраиваемым параметром. Алгоритм представляет собой пропорциональный закон управления с настраиваемым коэффициентом обратной связи и обеспечивает экспоненциальное стремление ошибки управления к окрестности нулевого положения равновесия. Показано, что радиус окрестности может быть уменьшен произвольным образом за счет изменения параметров регулятора. **Основные результаты.** В целях синтеза закона управления и моделирования замкнутой системы синтезирована динамическая нелинейная модель крутящего момента. Параметры и статические функции модели проидентифицированы с помощью данных, полученных в ходе FTP-теста (Federal Test Procedure, USA) автомобиля Chevrolet Tahoe с восьмицилиндровым двигателем объемом 5,7 л. Построен алгоритм адаптивного управления моментом, с помощью метода функций Ляпунова проанализированы свойства замкнутой системы. Для проверки работоспособности системы управления проведено моделирование в среде MATLAB/Simulink. Из результатов моделирования видно, что при существенном изменении скорости вращения двигателя регулятор обеспечивает ограниченность всех сигналов и стремление ошибки к ограниченной окрестности нулевого положения равновесия. Радиус окрестности существенно ниже допустимой ошибки управления 20 Н·м, что дает основания для дальнейшей практической реализации полученного алгоритма. **Практическая значимость.** Предложенный алгоритм управления рекомендуется к использованию в практической задаче управления моментом инжекторных и других видов двигателей внутреннего сгорания.

### Ключевые слова

адаптивное управление, нелинейная система, инжекторный двигатель, крутящий момент двигателя.

### Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031)

## AN ALGORITHM OF ADAPTIVE TORQUE CONTROL IN INJECTOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE

D.N. Gerasimov<sup>a</sup>, M.V. Lyzlova<sup>a</sup>, F.L. Mogilevtsev<sup>a</sup>, V.O. Nikiforov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: [mogfl@yandex.ru](mailto:mogfl@yandex.ru)

### Article info

Received 14.05.15, accepted 05.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-623-631

Article in Russian

**For citation:** Gerasimov D.N., Lyzlova M.V., Mogilevtsev F.L., Nikiforov V.O. An algorithm of adaptive torque control in injector internal combustion engine. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 623–631.

**Abstract**

**Subject of Research.** Internal combustion engine as a plant is a highly nonlinear complex system that works mostly in dynamic regimes in the presence of noise and disturbances. A number of engine characteristics and parameters is not known or known approximately due to the complex structure and multimode operating of the engine. In this regard the problem of torque control is not trivial and motivates the use of modern techniques of control theory that give the possibility to overcome the mentioned problems. As a consequence, a relatively simple algorithm of adaptive torque control of injector engine is proposed in the paper. **Method.** Proposed method is based on nonlinear dynamic model with parametric and functional uncertainties (static characteristics) which are suppressed by means of adaptive control algorithm with single adjustable parameter. The algorithm is presented by proportional control law with adjustable feedback gain and provides the exponential convergence of the control error to the neighborhood of zero equilibrium. It is shown that the radius of the neighborhood can be arbitrary reduced by the change of controller design parameters. **Main Results.** A dynamical nonlinear model of the engine has been designed for the purpose of control synthesis and simulation of the closed-loop system. The parameters and static functions of the model are identified with the use of data acquired during Federal Test Procedure (USA) of Chevrolet Tahoe vehicle with eight cylinders 5,7L engine. The algorithm of adaptive torque control is designed, and the properties of the closed-loop system are analyzed with the use of Lyapunov functions approach. The closed-loop system operating is verified by means of simulation in the MatLab/Simulink environment. Simulation results show that the controller provides the boundedness of all signals and convergence of the control error to the neighborhood of zero equilibrium despite significant variations of engine speed. The radius of the neighborhood is far less than required level of 20 N·m that affords ground for practical implementation of the algorithm. **Practical Relevance.** The proposed algorithm is recommended for application in the practical problem of torque control in injector and other types of ICE.

**Keywords**

adaptive control, nonlinear system, injector engine, engine torque.

**Acknowledgements**

This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01), the Russian Ministry of Education and Science (project 14.Z50.31.0031).

**Введение**

В целях обеспечения безопасности и комфорта водителя автомобиля, а также оптимизации мощностных, эксплуатационных и топливно-экономических характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС) существует необходимость в поддержании крутящего момента двигателя на желаемом уровне. Такая необходимость возникает, например, при решении следующих пользовательских задач:

- задача поддержания в режиме холостого хода постоянного момента, необходимого для преодоления внутренних сил трения и сопротивления привода генератора;
- задача максимизации момента на низких и высоких оборотах двигателя с целью повышения тяговых характеристик автомобиля;
- задача экстренного ограничения момента при взаимодействии с системами безопасности автомобиля;
- задача компенсации момента нагрузки, вызванного, в частности, переключением передач или неровностью дорожного покрытия.

С точки зрения теории управления, приведенный спектр задач сводится к формальной задаче слежения регулируемой переменной (развиваемого двигателем момента) за эталонным значением.

Двигатель как объект управления является сложной, существенно нелинейной системой, работающей, как правило, в динамических режимах в условиях действия возмущений [1–22]. В силу сложности конструкции и многорежимности работы двигателя ряд его характеристик и параметров неизвестны или неточно известны. В этих условиях задача управления моментом представляется нетривиальной и требует применения современных методов управления, позволяющих парировать указанные особенности.

Подавляющее большинство решений задачи управления моментом основано на статических таблицах, сформированных на этапе предварительной калибровки двигателя и представляющих собой зависимости управляющих воздействий от переменных состояния двигателя. Очевидно, что для возмущенных систем, работающих в динамических режимах, статические таблицы имеют ограничения по качеству. Важно также отметить, что калибровка двигателя – это длительный процесс, занимающий месяцы, что также является еще одним из существенных недостатков этого метода. Для повышения точности работы системы управления двигателем важно учитывать в законе управления нелинейную динамику, внешние возмущения и неопределенности ДВС, что достигается с помощью построения высокоточных универсальных моделей. В то же время не менее важно снизить затраты на калибровку двигателя за счет построения на базе модели закона управления, обеспечивающего желаемый крутящий момент во всех рабочих режимах.

За последние два десятилетия было разработано большое количество методов и алгоритмов, позволяющих решить те или иные проблемы управления моментом. В [3–9] используются методы локальной линеаризации нелинейных моделей в совокупности с методами теории линейных систем. В [10, 11] предлагаются алгоритмы нелинейного управления на основе нелинейных моделей с известными параметрами и методов градиентного спуска. В [12, 13] рассматриваются методы управления на основе прогнозирующих моделей. В [14–16] проблема управления моментом решается с помощью искусственных нейронных сетей. В работе [17] предложена итеративная процедура обучения регулятора.

Кроме того, авторами были проведены исследования в области управления крутящим моментом ДВС, которые отражены в публикациях [18–22]. В [18] приведен алгоритм адаптивного гибридного управления моментом, предполагающий разбиение сложной нелинейной модели объекта на совокупность более простых моделей, для каждой из которых строится настраиваемый закон управления с относительно простой структурой. В ходе практической реализации дополнительно реализуется алгоритм выбора соответствующего регулятора (так называемый супервизор). Отличительной особенностью гибридного закона управления является высокий уровень его сложности, возрастающий при повышении требований к точности системы. В [19, 20] приведены алгоритмы адаптивного управления моментом, построенные на базе универсальной модели и обеспечивающие цель управления за счет компенсации постоянных неизвестных параметров этой модели. При этом допускается, что все статические характеристики, отвечающие за формирование момента, точно известны. В [21, 22] эти алгоритмы модифицируются на случай неизвестных параметров и статических характеристик, что позволяет повысить точность системы без значительного усложнения структуры регулятора.

Отличие предлагаемого в настоящей работе метода управления моментом заключается в том, что в его основе лежит нелинейная динамическая модель, изложенная в [19–22] и содержащая параметрические и функциональные неопределенности (статические характеристики), которые подавляются при помощи алгоритма адаптивного управления с единственным настраиваемым параметром. Предлагаемый алгоритм имеет более простую структуру, чем алгоритмы, изложенные в [3–22], и содержит всего один оператор дифференцирования. Идея построения и обоснование работоспособности подобных алгоритмов простой структуры в общем виде были представлены в работах [23, 24]. В настоящей работе теоретические результаты [23, 24] модифицируются для применения в практической задаче управления крутящим моментом инжекторного двигателя.

### Постановка задачи

Цель управления заключается в обеспечении неравенства вида

$$|M_{ж}(t) - M(t)| \leq \Delta, \quad \forall t \geq T,$$

где  $M_{ж}$  – желаемое значение крутящего момента;  $M$  – усредненное за один цикл работы ДВС значение крутящего момента;  $T$  – время настройки системы;  $\Delta$  – допустимая максимальная ошибка слежения.

Управление крутящим моментом осуществляется с помощью дроссельной заслонки, расположенной во впускном коллекторе и регулирующей поток воздуха в цилиндры. Сигналом управления является угол поворота заслонки  $\alpha$ . Предполагается, что другие системы управления ДВС (впрыском топлива, углом опережения зажигания и т.п.) работают в штатном режиме.

На практике величина  $\Delta$ , как правило, не должна превышать 20 Н·м.

### Модель момента

Приведем математическую модель двигателя, ориентированную на синтез управления моментом. Модель связывает сигнал управления  $\alpha$  с регулируемой переменной  $M$  и состоит из модели подсистемы давления воздуха во впускном коллекторе и модели подсистемы крутящего момента [1, 2, 10, 21, 22, 25, 26].

*Модель подсистемы давления воздуха во впускном коллекторе.* Модель основана на уравнении Менделеева–Клапейрона и имеет следующий вид:

$$\dot{P} + \eta_c(P, \omega) \frac{V_d \omega}{4\pi V_m} P = \frac{RT_m}{V_m} \frac{\pi D^2}{4} \eta_t \varphi_1(P) \varphi_2(\alpha), \quad (1)$$

где  $P$  – давление воздуха;  $\eta_c$  – эффективность наполнения цилиндров;  $V_d$  – объем двигателя;  $\omega$  – скорость вращения коленчатого вала;  $V_m$  – объем впускного коллектора;  $R$  – удельная газовая постоянная для воздуха;  $T_m$  – температура воздуха во впускном коллекторе;  $\eta_t$  – эффективность дроссельной заслонки;  $\varphi_1(P)$  – ограниченная функция;  $D$  – диаметр патрубка с дроссельной заслонкой;  $\varphi_2(\alpha)$  – функция, определяемая как

$$\varphi_2(\alpha) \approx \left( 1 - \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\alpha_0)} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  – угол дроссельной заслонки, при котором она полностью перекрывает отверстие коллектора (известная величина).

*Модель подсистемы крутящего момента.* Крутящий момент ДВС может быть рассчитан из разности момента, развиваемого валом (эффективного момента), и момента сил сопротивления:

$$M = \frac{V_d Q_{HV}}{4\pi R T_m F_s} \eta_f(\omega) \varphi_3(\lambda) \varphi_4(\theta_{ign}) P - M_F, \quad (3)$$

где  $\eta_f$  – эффективность сгорания топлива;  $F_s$  – оптимальное соотношение воздух/топливо (В/Т) в цилиндрах;  $Q_{HV}$  – удельная теплота сгорания топлива;  $\lambda$  – коэффициент избытка воздуха;  $\theta_{ign}$  – угол опережения зажигания;  $\varphi_3(\lambda)\varphi_4(\theta_{ign})$  – эффективности момента по коэффициенту избытка воздуха и углу опережения зажигания соответственно, которые могут быть найдены как теоретически, так и экспериментально;  $M_F$  – момент сил трения, определяемый эмпирической зависимостью:

$$M_F = c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2, \quad (4)$$

где  $c_0, c_1, c_2$  – постоянные коэффициенты.

Для простоты восприятия представим модель (1)–(4) в более компактной форме:

$$\begin{cases} \dot{P} = A_c P + B_c \varphi_2(\alpha), \\ M = C_c P - D_c, \end{cases} \quad (5)$$

где  $A_c = -\eta_c(P) \frac{V_d \omega}{4\pi V_m}$ ,  $B_c = \eta_t(P) \frac{RT_m}{V_m} \frac{\pi D^2}{4} \varphi_1(P)$ ,  $C_c = \frac{V_d Q_{HV}}{4\pi RT_k F_s} \eta_f(\omega) \varphi_3(\lambda) \varphi_4(\theta_{ign})$ ,  $D_c = c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2$ .

Модель имеет следующие свойства.

1. Модель является нелинейной и аффинной по  $\varphi_2(\alpha)$ .
2. Постоянные параметры и функции  $\eta_c(x)$ ,  $\eta_t(x)$ ,  $\eta_f(\omega)$ ,  $M_F$ ,  $\varphi_3(\lambda)$ ,  $\varphi_4(\theta_{ign})$  точно неизвестны, в связи с чем требуется их идентификация.
3. Уравнения модели представлены в непрерывном виде. В то же время переменные  $P$ ,  $M$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\lambda$  и  $\theta_{ign}$  измеряются дискретно с периодом, равным одной четверти оборота коленчатого вала (для восьмицилиндрового двигателя). Следовательно, для идентификации неизвестных параметров и функций уравнений (5) необходимо дискретизировать (5) с периодом

$$\tau(k) = 15/\omega(k),$$

где  $k$  – номер шага дискретного времени.

Перепишем (5) в дискретной форме, используя метод Эйлера:

$$P(k+1) = A_D(k)P(k) + B_D(k)\varphi_2(\alpha), \quad (6)$$

$$M(k) = C_D(k)P(k) - D_D(k), \quad (7)$$

где  $A_D = 1 - 15A_c/\omega$ ,  $B_D = 15B_c/\omega$ ,  $C_D = C_c$ ,  $D_D = D_c$ .

Разложим функции  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в ряды Тейлора по соответствующим аргументам и представим (6), (7) в виде авторегрессионных моделей:

$$\begin{cases} P(k+1) = \theta^T_{1...10} \xi_{1...10}(k) P(k) + \theta^T_{11...15} \xi_{11...15}(k) \varphi_2(\alpha(k)), \\ M(k) = \psi^T_{1...10} \mathbf{v}_{1...10}(k) P(k) - \psi^T_{11...13} \mathbf{v}_{11...13}(k), \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\xi^T_{1...10} = \begin{bmatrix} 1 & P & P^2 & P^3 & P\omega & P^2\omega & P\omega^2 & \omega & \omega^2 & \omega^3 \end{bmatrix},$$

$$\xi^T_{11...15} = \begin{bmatrix} 1 & P & P^2 & P^3 & P^4 \end{bmatrix} - \text{компоненты вектора } \xi,$$

$$\mathbf{v}^T_{1...10} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_{ign} & \theta_{ign}\omega & \theta_{ign}\lambda & \theta_{ign}^2 & \omega & \omega\lambda & \omega^2 & \lambda & \lambda^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}^T_{11...13} = \begin{bmatrix} 1 & \omega & \omega^2 \end{bmatrix}^T - \text{компоненты вектора } \mathbf{v},$$

$\theta^T_{1...10}$ ,  $\theta^T_{11...15}$ ,  $\psi^T_{1...10}$ ,  $\psi^T_{11...13}$  – компоненты векторов неизвестных параметров.

Представление (8) позволяет применить алгоритм наименьших квадратов для идентификации параметров  $\theta$  и  $\psi$ .

В ходе идентификации использованы данные, полученные в ходе FTP-теста<sup>1</sup> автомобиля Chevrolet Tahoe с восьмицилиндровым двигателем объемом 5,7 л. Результаты проверки модели приведены на

<sup>1</sup> FTP18 (Federal Test Procedure) — принятый в США федеральный испытательный цикл для определения уровней выбросов токсичных компонентов с обработавшими газами легкового автомобиля. Тест проводится в стандартных условиях в специальном боксе, внутри которого осуществляется точное воспроизведение заданных условий движения, имитирующих движение автомобиля по улицам города

рис. 1, где представлены экспериментальные ( $P_{\text{эксп}}$  и  $M_{\text{эксп}}$ ) и моделируемые ( $P_{\text{мод}}$  и  $M_{\text{мод}}$ ) процессы изменения давления во впускном коллекторе и развиваемого момента соответственно.

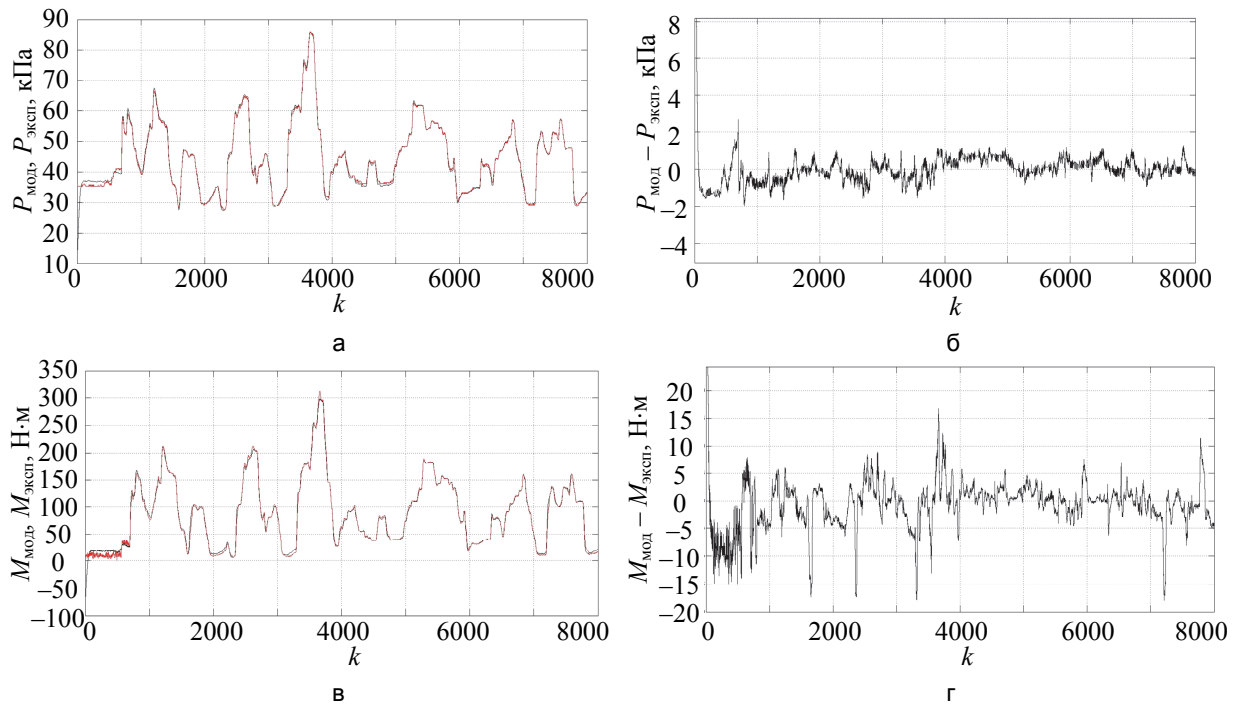


Рис. 1. Результаты сравнения переменных модели и экспериментальных данных: экспериментальное и модельное значения давления (а); ошибка модели подсистемы давления (б); экспериментальное и модельное значения крутящего момента (в); ошибка модели подсистемы момента (г)

На рис. 1, б, г, представлены отклонения моделируемых процессов от экспериментальных. Из результатов видно, что максимальная ошибка модели по давлению не превышает 3% от амплитуды давления, максимальная ошибка по моменту не превышает 5%. Таким образом, качество модели является приемлемым, что позволяет синтезировать управление, удовлетворяющее заданной точности по моменту.

Полученные для дискретной модели функции  $\theta^T_{1...10} \xi_{1...10}$ ,  $\theta^T_{11...15} \xi_{11...15}$ ,  $\psi^T_{1...10} v_{1...10}$ ,  $\psi^T_{11...13} v_{11...13}$  позволяют определить неизвестные функции непрерывной модели (5), на базе которой синтезируется управление.

### Синтез управления

Регулятор строится на основе простого алгоритма адаптации, идея которого изложена в [10] и заключается в замыкании объекта настраиваемой «сильной» обратной связью, обеспечивающей устойчивость замкнутой системы и экспоненциальное стремление ошибки управления к окрестности нулевого положения равновесия.

В целях синтеза регулятора сформируем эталонную модель:

$$\dot{M}_ж = -\rho M_ж + \rho M^*, \tag{9}$$

где  $M^*$  – задающее воздействие,  $\rho > 0$  – параметр эталонной модели, определяющий быстродействие замкнутой системы после адаптивной настройки регулятора.

Далее определим ошибку управления  $\varepsilon = M_ж - M$ , продифференцируем ее по времени и с учетом (5), (9) проведем ряд алгебраических преобразований:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\rho M_ж + \rho M^* - \dot{C}_c P - C_c \dot{P} - \dot{D}_c = \\ &= -\rho M_ж + \rho M^* - \dot{C}_c P - C_c A_c P - C_c B_c \varphi_2(\alpha) - \dot{D}_c = \\ &= -\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right) M - C_c B_c \varphi_2(\alpha) - \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right) D_c - \rho M_ж + \rho M^* - \dot{D}_c \pm \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right) M_ж = \\ &= -\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right) \varepsilon - C_c B_c \varphi_2(\alpha) + \delta, \end{aligned}$$

или

$$\dot{\varepsilon} = -\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right)\varepsilon - C_c B_c \varphi_2(\alpha) + \delta, \quad (10)$$

где  $\delta = -\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right)D_c + \rho M^* - \dot{D}_c - \left(\rho + \frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c\right)M_j$ .

Следует заметить, что в силу физической ограниченности всех переменных модели и их производных, величины  $\dot{C}_c$ ,  $\dot{D}_c$  ограничены, равно как и переменные эталонной модели. Следовательно, величина  $\delta$  ограничена. Кроме того,  $C_c B_c > 0$ , что позволяет применить закон управления вида

$$\varphi_2(\alpha) = r\varepsilon \quad (11)$$

или, с учетом (2),

$$\alpha = \text{Arccos}(\cos \alpha_0 - \cos \alpha_0 (r\varepsilon)), \quad (12)$$

$$\dot{r} = -\sigma r + \gamma \varepsilon^2, \quad (13)$$

где  $\gamma$ ,  $\sigma > 0$  – константы.

Докажем свойства замкнутой системы, подставив (11) в (10), выбрав функцию Ляпунова  $V = 0,5\varepsilon^2$  и проанализировав ее производную:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right)\varepsilon^2 + \delta\varepsilon \pm 0,5\delta^2 / \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right) = \\ &= -0,5\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right)\varepsilon^2 - \left(\sqrt{0,5\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right)}\varepsilon - \sqrt{0,5 / \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right)}\delta\right)^2 + \\ &+ 0,5\delta^2 / \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right) \leq -\left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right)V + 0,5\delta^2 / \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right). \end{aligned}$$

Из полученного неравенства следует экспоненциальная сходимость  $\varepsilon$  к ограниченному множеству при  $r$ , превышающем  $-\frac{\dot{C}_c}{B_c C_c^2} - \frac{A_c}{C_c B_c}$ . Радиус окрестности определяется ограниченной величиной

$0,5\delta^2 / \left(\frac{\dot{C}_c}{C_c} + A_c + C_c B_c r\right)$  и может быть уменьшен путем увеличения амплитуды  $r$ , что, в свою очередь, достигается за счет повышения  $\gamma$  и (или) снижения  $\sigma$  в выражении (13).

Важно отметить, что величина  $\gamma$  не может быть увеличена произвольным образом (равно как и  $\sigma$  не может быть уменьшена произвольным образом) в силу ограниченной области определения функции  $\text{Arccos}$  в (12).

### Моделирование

На рис. 2 представлены результаты моделирования замкнутой системы с синтезированным регулятором простой структуры. Параметры и функции модели (5), полученные в ходе идентификации, а также параметры регулятора приведены в таблице. Входные сигналы модели принимают следующие значения:  $\theta_{ign} = 30^\circ, \lambda = 1$ .

С целью формирования реализуемого управления в аргументе функции  $\text{Arccos}$  задействован блок насыщения  $\text{sat}_{[0,1]} \{\cos \alpha_0 - \cos \alpha_0 (r\varepsilon)\}$ .

Из результатов моделирования видно, что при существенном изменении скорости вращения двигателя регулятор обеспечивает ограниченность всех сигналов и стремление ошибки к ограниченной окрестности нулевого положения равновесия. Радиус окрестности существенно ниже ошибки управления 20 Н·м, что дает основания для дальнейшей практической реализации полученного алгоритма.

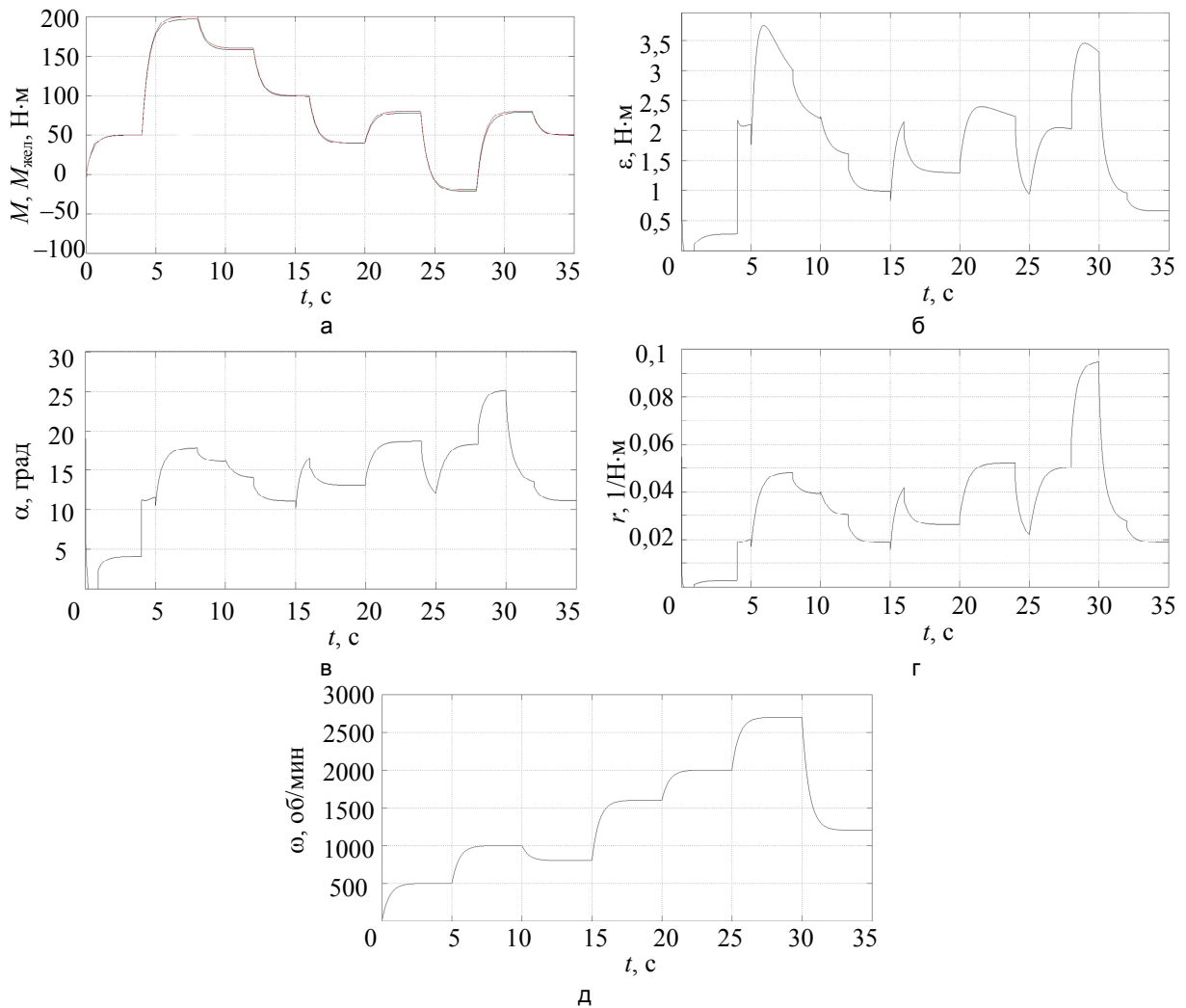


Рис. 2. Результаты моделирования системы управления, замкнутой адаптивным регулятором (13), (14): текущее и желаемое значения крутящего момента (а); ошибка управления (б); угол открытия дроссельной заслонки (в); коэффициент обратной связи (г); скорость двигателя (д)

Параметр	Значение / вид функции
Модель (5)	
$\alpha_0$	$3,5 \times 10^{-2}$
$A_c$	$(1,02 \times 10^{-1} - (1,9 \times 10^{-3})P + (2,9 \times 10^{-6})P^2 + (3,68 \times 10^{-8})P^3 - (1,18 \times 10^{-4})\omega + (4,66 \times 10^{-8})\omega^2 - (1,01 \times 10^{-11})\omega^3 + (5,21 \times 10^{-7})P\omega - (6,89 \times 10^{-9})P^2\omega + (2,2 \times 10^{-9})P\omega^2) / \tau$
$B_c$	$4,745 + (7,66 \times 10^{-3})P - (2,89 \times 10^{-3})P^2 + (8,09 \times 10^{-5})P^3 - (5,37 \times 10^{-7})P^4$
$C_c$	$162,93 - (5,61 \times 10^{-1})\theta_{ign} + (9,24 \times 10^{-5})\theta_{ign}\omega + (6,13 \times 10^{-1})\theta_{ign}\lambda - (1,21 \times 10^{-3})\theta_{ign}^2 - (1,75 \times 10^{-2})\omega + (3,77 \times 10^{-2})\omega\lambda - (7 \times 10^{-6})\omega^2 - 189,82\lambda + 57,98\lambda^2$
$D_c$	$106,72 + (2,36 \times 10^{-2})\omega - (8,32 \times 10^{-6})\omega^2$
$\tau$	$15 / \omega$
Регулятор (12), (13)	
$\gamma$	$10^{-6}$
$\sigma$	$10^{-12}$
$r(0)$	0

Таблица. Параметры модели и регулятора

### Заключение

Таким образом, на основе разработанной для восьмицилиндрового двигателя автомобиля Chevrolet Tahoe математической модели крутящего момента синтезирован алгоритм адаптивного управления моментом. Алгоритм предполагает измерение только величины крутящего момента и настройку одного параметра. Алгоритм обеспечивает ограниченность всех сигналов и стремление ошибки управления к ограниченному множеству нулевого положения равновесия. При этом радиус окрестности может быть уменьшен путем увеличения коэффициента  $\gamma$  и (или) уменьшения  $\sigma$  в выражении (13). Для проверки работы замкнутой системы было проведено моделирование в среде MATLAB/Simulink.

В связи с тем, что рост настраиваемого параметра  $r$  неизбежно усиливает высокочастотный шум в канале управления, дальнейшие исследования в рамках решаемой задачи планируется направить на подавление действия этого шума.

### References

1. *Dvigateli Vnutrennego Sgoraniya. Kn. 1. Teoriya Rabochikh Protssesov* [Internal Combustion Engines. Book 1. Theory of Workflows]. Eds. V.N. Lukanin, M.G. Shatrov. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2005, 479 p.
2. Gerasimov D.N., Nikiforov V.O., Javaherian H., Efimov D.V. Injection engine as a control object. I. Schematic diagram of the engine and synthesis of a mathematical model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2010, vol. 49, no. 5, pp. 811–822. doi: 10.1134/S1064230710050151
3. Stefanopoulou A.G., Grizzle J.W., Freudenberg J.S. Engine air-fuel ratio and torque control using secondary throttles. *Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control*, 1994, vol. 3, pp. 2748–2753.
4. Jankovic M., Frischmuth F., Stefanopoulou A., Cook J.A. Torque management of engines with variable cam timing. *IEEE Control Systems Magazine*, 1998, vol. 18, no. 5, pp. 34–42. doi: 10.1109/37.722251
5. Jankovic M., Magner M., Hsieh S., Koncsol J. Transient effects and torque control of engines with variable cam timing. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 50–54.
6. Karnik A.Y., Buckland J.H., Freudenberg J.S. Electronic throttle and wastegate control for turbocharged gasoline engines. *Proceedings of the American Control Conference*, 2005, vol. 7, pp. 4434–4439.
7. Ali A., Blath J.P. Nonlinear torque control of a spark-ignited engine. *Proceedings of the American Control Conference*, 2006, pp. 3266–3271.
8. Ali A., Blath J.P. Application of modern techniques to SI-engine torque control. *Proc. of the IEEE International Conf. on Control Applications*. Munich, Germany, 2006, pp. 2405–2410. doi: 10.1109/CACSD-CCA-ISIC.2006.4777017
9. Hong M., Ouyang M., Shen T., Li J. Model-based PI feedback control of engine torque. *IEEE International Conference on Control and Automation*. Xiamen, China, 2010, pp. 12–15. doi: 10.1109/ICCA.2010.5524184
10. Kolmanovsky I.V., Druzhinina M., Sun J. Speed-gradient approach to torque and air-to-fuel ratio control in DISC engines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 671–678. doi: 10.1109/TCST.2002.801803
11. Hong M., Shen T., Ouyang M. Nonlinear observer-based torque control for SI engine. *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference*. Fukuoka, Japan, 2009, pp. 4114–4119.
12. Vermillion C., Butts K., Reidy K. Model predictive engine torque control with real-time driver-in-the-loop simulation results. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*. Baltimore, USA, 2010, pp. 1459–1464.
13. Sakai Y., Kanai M., Yamakita M. Torque demand control by nonlinear MPC with constraints for vehicles with variable valve lift engine. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*. Yokohama, Japan, 2010, pp. 1642–1647. doi: 10.1109/CCA.2010.5611240
14. Javaherian H., Liu D., Kovalenko O. Automotive engine torque and air-fuel ratio control using dual heuristic dynamic programming. *IEEE International Conference on Neural Networks*. Vancouver, Canada, 2006, art. 1716137, pp. 518–525.
15. Zweiri Y.H., Seneviratne L.D. Diesel engine indicated torque estimation based on artificial neural networks. *Proc. IEEE/ACS Int. Conf. on Computer Systems and Application, AICCSA 2007*. Amman, Jordan, 2007, art. 4231051, pp. 791–798. doi: 10.1109/AICCSA.2007.370723
16. Huang K., Wang S., Jin Z., Jiang D. Feedforward method of engine torque estimation. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES*. Shanghai, China, 2006, pp. 246–249. doi: 10.1109/ICVES.2006.371592
17. Nagata T., Tomizuka M. Robust engine torque control by iterative learning control. *Proceedings of the American Control Conference*, 2009, pp. 2064–2069. doi: 10.1109/ACC.2009.5159841
18. Kolyubin S.A., Nikiforov V.O., Bobtsov A.A., Efimov D.V. Two-channel adaptive hybrid control of the air-to-fuel ratio and torque of automobile engines. *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 11, pp. 1794–1807. doi: 10.1134/S0005117912110033



19. Gerasimov D.N., Kolyubin S.A., Nikiforov V.O. Adaptive air-to-fuel ratio and torque control of injector internal combustion engines. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2009, no. 1 (59), pp. 14–21. (in Russian)
20. Gerasimov D.N., Javaherian H., Efimov D.V., Nikiforov V.O. Injection engine as a control object. II. Problems of automatic control of the engine. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2010, vol. 49, no. 6, pp. 998–1008. doi: 10.1134/S1064230710060183
21. Gerasimov D.N., Nikiforov V.O. Adaptive torque control in injector internal combustion engines. *Mehatronika, Avtomatizacia, Upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 47–55. (in Russian)
22. Gerasimov D.N., Nikiforov V.O., Paramonov A.V., Serov D.S. Adaptive control of torque in fuel-injection internal combustion engine with variable valve timing. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 12, pp. 28–33. (in Russian)
23. Nikiforov V.O., Gerasimov D.N. Analysis and synthesis of complex systems adaptive stabilizing controller of a simple structure. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 5 (81), pp. 48–52. (in Russian)
24. Gerasimov D.N., Nikiforov V.O. Simple adaptive output control of linear systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Control, ISIC 2014*. Juan Les Pins, France, 2014, pp. 566–571. doi: 10.1109/ISIC.2014.6967606
25. Ginoux S., Champoussin J. Engine torque determination by crankangle measurements: state of the art, future prospects. *SAE Technical Paper*, 1997, report 970532. doi: 10.4271/970532
26. Park S., Sunwoo M. Torque estimation of spark ignition engines via cylinder pressure measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2003, vol. 217, no. 9, pp. 809–817.

<b>Герасимов Дмитрий Николаевич</b>	– кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, gerasimovdn@mail.ru
<b>Лызлова Мария Владимировна</b>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, lyzlovamv@yandex.ru
<b>Могилевцев Федор Леонидович</b>	– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mogfl@yandex.ru
<b>Никифоров Владимир Олегович</b>	– доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nikiforov@mail.ifmo.ru
<b>Dmitry N. Gerasimov</b>	– PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, gerasimovdn@mail.ru
<b>Mariya V. Lyzlova</b>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, lyzlovamv@yandex.ru
<b>Fedor L. Mogilevtsev</b>	– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mogfl@yandex.ru
<b>Vladimir O. Nikiforov</b>	– D.Sc., Professor, Vice-Rector for Research, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nikiforov@mail.ifmo.ru