

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 519.711.3 – 62.40

Д. Н. ГЕРАСИМОВ, В. О. НИКИФОРОВ, А. В. ПАРАМОНОВ, Д. С. СЕРОВ

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРУТЯЩИМ МОМЕНТОМ В ИНЖЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ФАЗАМИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Решается задача адаптивного управления крутящим моментом в инжекторном двигателе внутреннего сгорания с переменными фазами газораспределения. В основе синтеза регулятора лежит параметрически и функционально неопределенная модель момента. Используется метод непрямого адаптивного управления. Представлены результаты моделирования в среде MatLab/Simulink.

*Ключевые слова:* инжекторный двигатель внутреннего сгорания, переменные фазы газораспределения, моделирование ДВС, адаптивное управление ДВС.

**Введение.** Разработка высокоточных самокалибрующихся систем управления двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является одним из приоритетных направлений в развитии современного автомобилестроения. Главными целями создания таких систем является оптимизация мощностных характеристик, экономия топлива, снижение выброса вредных веществ в атмосферу. Не менее важные задачи — сокращение времени производства двигателя, повышение срока его эксплуатации, а также обеспечение безопасности и комфорта водителя.

Для улучшения топливно-экономических и мощностных показателей ДВС, а также снижения токсичности отработавших газов современные автомобили оснащаются электронными системами управления дроссельной заслонкой (ЭСУДЗ), которые плавно регулируют крутящий момент двигателя в зависимости от положения педали акселератора и текущего режима работы автомобиля. ЭСУДЗ позволяют:

- поддерживать постоянный крутящий момент в режиме холостого хода двигателя или в режиме круиз-контроля;
- сглаживать реакцию двигателя на резкое нажатие педали акселератора, обеспечивая тем самым плавное и свободное от вибраций поведение автомобиля;
- взаимодействовать с системами безопасности автомобиля и в случае экстренной ситуации — ограничивать момент двигателя;
- компенсировать момент нагрузки, который вызван, в частности, переключением передач или неровностью дорожного покрытия.

В терминах теории управления ЭСУДЗ обеспечивает решение задачи слежения крутящего момента за желаемым значением. При этом многофункциональность ЭСУДЗ открывает широкие возможности по усовершенствованию ДВС для разработчиков систем автоматического управления.

Подавляющее большинство реализуемых решений по созданию ЭСУДЗ основано на статических таблицах, сформированных на этапе предварительной калибровки двигателя и представляющих собой зависимости управляющих воздействий от переменных состояния двигателя. В то же время двигатель работает, как правило, в динамических режимах в условиях действия возмущений, его характеристики со временем изменяются. Очевидно, что при этом статические таблицы не могут обеспечить надлежащего качества. Важно также отметить: калибровка двигателя — процесс долгий (не один месяц), что также является недостатком этого метода. Таким образом, для повышения точности работы ЭСУДЗ необходимо учесть в законе управления нелинейную динамику, возмущения и неопределенности ДВС, в то же время с целью постоянного уточнения параметров двигателя важно обеспечить возможность его самокалибровки в ходе работы.

За последние 20 лет разработано большое количество методов и алгоритмов, позволяющих парировать те или иные проблемы управления моментом. В [1—7] предлагаются методы теории линейных систем, включая методы локальной линеаризации нелинейных моделей; в [8, 9] представлены алгоритмы нелинейного управления на основе нелинейных моделей с известными параметрами и методов градиентного спуска. В работах [10, 11] рассматриваются методы управления на основе прогнозирующих моделей, в [12—14] проблема управления моментом решается с помощью искусственных нейронных сетей. В статье [15] предложена итеративная процедура обучения регулятора, а в [16] — решение задачи управления на основе принципа инверсной динамики и инверсной модели.

Отличие предлагаемых в настоящей статье алгоритмов управления моментом заключается в том, что лежащая в основе их синтеза нелинейная динамическая модель содержит параметрические и функциональные неопределенности, которые в ходе работы двигателя компенсируются с помощью методов адаптивного управления. Таким образом, повышается точность работы системы и появляется возможность самокалибровки двигателя в ходе его эксплуатации.

Для снижения расхода топлива, увеличения мощностных показателей и уменьшения количества токсичных выбросов используется система переменных фаз газораспределения, позволяющая обеспечивать оптимальные процессы смесеобразования, однако при этом возникают дополнительные неопределенности в законе управления двигателем, которые необходимо компенсировать.

**Постановка задачи.** Задача управления заключается в компенсации нелинейной динамики и неопределенностей двигателя, внешних и внутренних возмущений и в обеспечении выполнения целевого неравенства:

$$\left| M(k) - M^*(k) \right| \leq \Delta_M \quad \text{для всех } k \geq T_M, \quad (1)$$

где  $M(k)$  — усредненный за один цикл работы двигателя момент,  $M^*(k)$  — желаемый момент,  $T_M$  — время переходного процесса,  $\Delta_M$  — погрешность слежения,  $k$  — шаг времени, соответствующий одной второй оборота коленчатого вала (для четырехцилиндровых двигателей). Допустимой погрешностью для системы управления считается 10—15 %.

Переменной управления в проектируемой системе является положение дроссельной заслонки во впускном коллекторе.

Задача решается в предположении, что регулятор топлива, регулятор угла опережения зажигания и регуляторы фаз газораспределения функционируют в рабочих режимах.

**Модель двигателя.** На основе фундаментальных законов физики, описывающих аэродинамику течения воздушного потока во впускном коллекторе и процесс преобразования энергии, выделяющейся при сгорании топлива, в крутящий момент, формируется математическая модель момента [17—19]. Модель, оперирующая переменными, усредненными за

один цикл работы двигателя (усредненная модель), представляет собой последовательность преобразований сигнала управления  $\alpha$  в регулируемую переменную  $M$ .

Модель состоит из уравнения эффективного момента двигателя и уравнения динамики давления воздуха во впускном коллекторе, описываемого выражением

$$P(k+1) = \left( 1 - \eta_c(P(k), \omega(k), \theta_{ivo}(k), \theta_{evc}(k)) \frac{30V_d}{4\pi V_m} \right) P(k) + \frac{30RT_m}{\omega(k)V_m} \eta_t(P(k)) \varphi_1(P(k)) \varphi_2(\alpha(k)), \quad (2)$$

где  $P$  — давление воздуха во впускном коллекторе,  $\omega$  — скорость вращения коленчатого вала,  $\theta_{ivo}$  и  $\theta_{evc}$  — угол открытия и закрытия выпускных клапанов,  $\eta_c$  — эффективность наполнения цилиндров,  $\eta_t$  — эффективность дроссельной заслонки,  $V_m$  — объем впускного коллектора,  $T_m$  — температура воздуха во впускном коллекторе,  $V_d$  — объем двигателя,

$$\varphi_2(\alpha) = \frac{\pi D^2}{4} \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \right) \quad (3)$$

— площадь поперечного сечения открытой части патрубка с дроссельной заслонкой,  $D$  — диаметр патрубка с дроссельной заслонкой,  $\alpha_0$  — угол дроссельной заслонки при полном закрытии патрубка заслонкой,  $\varphi_1(P)$  — некоторая эмпирически установленная зависимость.

Следующее выражение определяет эффективный крутящий момент как функцию скорости вращения коленчатого вала  $\omega$ , коэффициента избытка воздуха  $\lambda$  и угла опережения зажигания  $\theta_{ign}$ :

$$M = \frac{V_d Q_{hv}}{4\pi RT_m F_S} \eta_c(P(k), \omega(k), \theta_{ivo}(k), \theta_{evc}(k)) \eta_f(\omega) \varphi_3(\lambda) \varphi_4(\theta_{ign}) P - M_L(\omega), \quad (4)$$

где  $Q_{hv}$  — теплотворная способность топлива,  $\eta_f(\omega)$  — эффективность сгорания топлива,  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$  — эффективности момента по коэффициенту избытка воздуха и углу опережения зажигания соответственно,  $F_S$  — стехиометрическое соотношение воздух—топливо,  $M_L$  — момент внутреннего трения, определяемый эмпирической зависимостью вида:

$$M_L(\omega) = c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2, \quad (5)$$

где  $c_0, c_1, c_2$  — постоянные параметры.

Представленная модель момента обладает следующими свойствами.

1. Модель является линейной по отношению к функции  $\varphi_2(\alpha)$ .
2. Переменные  $\alpha, M, P, \omega, \lambda, \theta_{ign}, \theta_{ivo}, \theta_{evc}$  доступны прямому измерению.
3. Ни тип инжекторного двигателя, ни вид топлива неизвестны, поэтому параметры  $c_0, c_1, c_2, Q_{hv}$  и функции  $\varphi_1(P), \eta_t(P), \eta_c(P, \omega, \theta_{ivo}, \theta_{evc}), \eta_f(\omega), \varphi_3(\lambda), \varphi_4(\theta_{ign}), M_L(\omega)$  неизвестны. Иными словами, модель момента является параметрически и функционально неопределенной, что требует использования методов адаптивного управления и идентификации.

Для идентификации неизвестные функции

$$\left( 1 - 30\eta_c V_d / 4\pi V_m \right), 30RT_m \eta_t(P(k)) \varphi_1(P(k)) / V_m \omega, V_d Q_{hv} \eta_c \eta_f \varphi_3 \varphi_4 / 4\pi RT_m F_S, M_L$$

раскладываются в ряды Тейлора по своим аргументам, после чего выражения (2) и (4) представляются в формах линейной регрессии:

$$P(k+1) = \theta_{1\dots 15}^T \xi_{1\dots 15}(k) P(k) + \theta_{16\dots 18}^T \xi_{16\dots 18}(k) \varphi_2(\alpha(k)) / \omega(k), \quad (6)$$

$$M(k) = \psi_{1\dots 21}^T \vartheta_{1\dots 21}(k) P(k) - \psi_{22\dots 24}^T \vartheta_{22\dots 24}(k), \quad (7)$$

где  $\theta_{1...15} \in R^{15}$ ,  $\theta_{16...18} \in R^3$ ,  $\psi_{1...21} \in R^{21}$ ,  $\psi_{22...24} \in R^3$  — компоненты вектора неизвестных параметров  $\theta \in R^{18}$  и  $\psi \in R^{24}$  соответственно\*,

$$\xi_{1...15}^T = [1 \ P \ \omega \ \theta_{\text{evc}} \ \theta_{\text{ivo}} \ P^2 \ \omega^2 \ \theta_{\text{evc}}^2 \ \theta_{\text{ivo}}^2 \ P\omega \ P\theta_{\text{evc}} \ P\theta_{\text{ivo}} \ \omega\theta_{\text{evc}} \ \omega\theta_{\text{ivo}} \ \theta_{\text{evc}}\theta_{\text{ivo}}],$$

$$\xi_{16...18}^T = [1 \ P \ P^2]$$

— компоненты вектора измеряемых функций  $\xi^T = [\xi_{1...15} \ \xi_{16...18}]$ ,

$$\vartheta_{1...21}^T = [1 \ \alpha_{\text{ign}} \ \omega \ \theta_{\text{evc}} \ \theta_{\text{ivo}} \ \lambda \ \alpha_{\text{ign}}^2 \ \omega^2 \ \theta_{\text{evc}}^2 \ \theta_{\text{ivo}}^2 \ \lambda^2 \ \alpha_{\text{ign}}\omega \ \alpha_{\text{ign}}\theta_{\text{evc}} \ \alpha_{\text{ign}}\theta_{\text{ivo}} \ \alpha_{\text{ign}}\lambda \ \omega\theta_{\text{evc}} \ \omega\theta_{\text{ivo}} \ \omega\lambda \ \theta_{\text{evc}}\theta_{\text{ivo}} \ \theta_{\text{evc}}\lambda \ \theta_{\text{ivo}}\lambda],$$

$$\vartheta_{22...24}^T = [1 \ \omega \ \omega^2]$$

— компоненты вектора измеряемых функций  $\vartheta^T = [\vartheta_{1...21} \ \vartheta_{22...24}]^T$ .

Для идентификации неизвестных параметров, содержащихся в векторах  $\theta$  и  $\psi$ , используются линейное регрессионное представление (6), (7), алгоритм наименьших квадратов и данные, полученные в ходе эксперимента.

Результаты идентификации параметров и проверки модели момента приведены на рис. 1 ( $P_{\text{мод}}$ ,  $M_{\text{мод}}$  — давление воздуха в коллекторе и момент, генерируемые (6) и (7) соответственно,  $P_{\text{эксп}}$ ,  $M_{\text{эксп}}$  — экспериментальные данные). Параметры двигателя (3) имеют следующие значения:  $\alpha_0 = 0,035$  рад ( $2^\circ$ ),  $D = 0,1$  м.

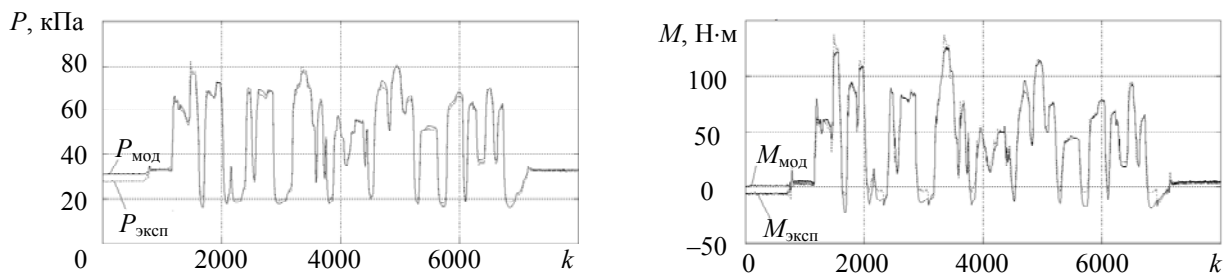


Рис. 1

Результаты эксперимента показали, что погрешность моделирования уравнения давления (6) составляет около 8 %, момента (7) — около 10 %. Важно отметить, что в условиях быстрого изменения давления и момента возникает наивысшая погрешность, которая сравнима с заявленной 10—15 %, в связи с чем возникает необходимость в коррекции коэффициентов модели и повышении ее точности с использованием методов адаптивной идентификации.

Идентифицированные параметры модели используются в дальнейшем для синтеза регулятора и моделирования адаптивной системы управления и именуются номинальными. Модель и закон управления, построенные с использованием этих параметров, также называются номинальными.

**Синтез номинального регулятора.** Пусть параметры модели (6), (7) равны номинальным. Тогда на основе метода модального управления дискретными системами и указанных свойств модели строится номинальный регулятор вида

\* Обозначение  $\theta_{1...15}$  вводится для вектора, состоящего из элементов с первого по пятнадцатый в векторе  $\theta$ . Аналогичные обозначения приняты для  $\theta_{16...18}$ ,  $\psi_{1...21}$ ,  $\psi_{22...24}$ .

$$\alpha(k) = \frac{4}{\pi D^2} \arccos \left\{ 1 - \frac{\omega(k)}{\theta_{16...18}^T \xi_{16...18}} \left[ (\sigma - \theta_{1...15}^T \xi_{1...15}) P(k) + (1 - \sigma) P^*(k) \right] \right\}, \quad (8)$$

где величина  $P^*$  связана с желаемым значением крутящего момента посредством уравнения (7) следующим образом:

$$P^*(k) = \frac{M^*(k) + \psi_{22...24}^T \vartheta_{22...24}(k)}{\psi_{1...21}^T \vartheta_{1...21}(k)}, \quad (9)$$

$\sigma \in [0, 1)$  — параметр регулятора, отвечающий за быстродействие системы.

**Синтез адаптивного управления.** Полагая, что параметры объекта управления, заложенные в векторах  $\theta$  и  $\psi$  неизвестны, заменим в (8), (9)  $\theta$  и  $\psi$  на оценки  $\hat{\theta}$  и  $\hat{\psi}$  и получим адаптивный закон управления:

$$\alpha(k) = \arccos \left\{ 1 - \frac{\omega(k)}{\hat{\theta}_{16...18}^T \xi_{16...18}} \left[ (\sigma - \hat{\theta}_{1...15}^T \xi_{1...15}) P(k) + (1 - \sigma) P^*(k) \right] \right\}, \quad (10)$$

$$P^*(k) = \frac{M^*(k) + \hat{\psi}_{22...24}^T \vartheta_{22...24}(k)}{\hat{\psi}_{1...21}^T \vartheta_{1...21}(k)}, \quad (11)$$

где оценки  $\hat{\theta}$  и  $\hat{\psi}$  генерируются алгоритмом наименьших квадратов на основе линейной регрессионной модели (6), (7).

Для проверки функционирования алгоритма в среде MatLab/Simulink было проведено моделирование системы управления с использованием данных теста автомобиля Chevrolet Equinox и модели момента (2)—(4). Приведенные на рис. 2 результаты моделирования при  $\sigma = 0,8$  подтверждают, что погрешность работы системы соответствует заданной (10—15 %).

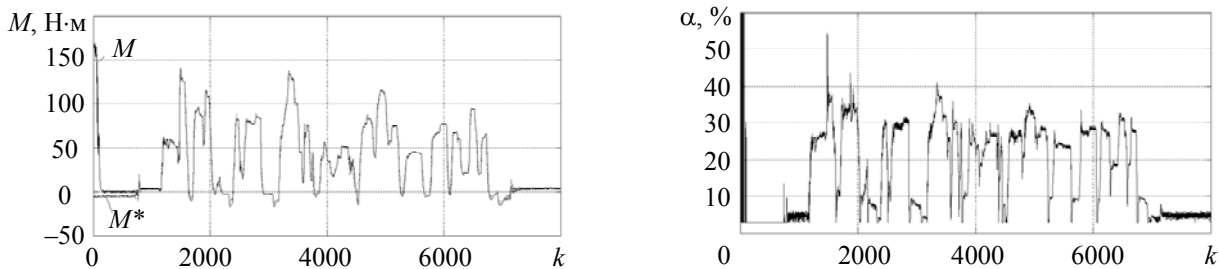


Рис. 2

**Заключение.** В статье предложено решение задачи адаптивного управления крутящим моментом инжекторного ДВС с переменными фазами газораспределения. В основе синтеза регулятора лежит параметрически и функционально неопределенная модель момента. Для достижения цели управления и компенсации неопределенностей модели используется метод непрямого адаптивного управления. Представлены результаты моделирования в среде MatLab/Simulink.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stefanopoulou A. G., Grizzle J. W., Freudenberg J. S. Engine Air-Fuel Ratio and Torque Control using Secondary Throttles // Proc. of the 33<sup>rd</sup> Conf. on Decision and Control. 1994. P. 2748—2753.
2. Jankovic M., Frischmuth F., Stefanopoulou A. et al. Torque management of engines with variable cam timing // IEEE Control Systems Magazine. 1998. Vol. 18. P. 34—42.

3. *Jankovic M., Magner M.* et al. Transient effects and torque control of engines with variable cam timing // Proc. of the American Control Conf. 2000. P. 50—54.
4. *Karnik A. Y., Buckland J. H., Freudenberg J. S.* Electronic Throttle and Wastegate Control for Turbocharged Gasoline Engines // American Control Conf. 2005. P. 4434—4439.
5. *Ali A., Blath J. P.* Nonlinear Torque Control of a Spark-Ignited Engine // Proc. of the American Control Conf. 2006. P. 3266—3271.
6. *Ali A., Blath J. P.* Application of Modern Techniques to SI-Engine Torque Control // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Control Applications. 2006. P. 2405—2410.
7. *Hong M., Ouyang M.* et al. Model-based PI Feedback Control of Engine Torque // IEEE Intern. Conf. on Control and Automation. 2010. P. 12—15.
8. *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. P. 671—678.
9. *Hong M., Shen T., Ouyang M.* Nonlinear Observer-based Torque Control for SI Engine // ICROS-SICE Intern. Joint Conf. 2009. P. 4114—4119.
10. *Vermillion C., Butts K., Reidy K.* Model Predictive Engine Torque Control with Real-Time Driver-in-the-Loop Simulation Results // American Control Conf. 2010. P. 1459—1464.
11. *Sakai Y., Kanai M., Yamakita M.* Torque demand control by nonlinear MPC with constraints for vehicles with variable valve lift engine // IEEE Intern. Conf. on Control Appl. 2010. P. 1642—1647.
12. *Javaherian H., Liu D., Kovalenko O.* Automotive Engine Torque and Air-Fuel Ratio Control Using Dual Heuristic Dynamic Programming // Intern. Joint Conf. on Neural Networks. 2006. P. 518—525.
13. *Zweiri Y. H., Seneviratne L. D., Jordan K.* Diesel Engine Indicated Torque Estimation Based on Artificial Neural Networks // IEEE Computer Society. 2007. P. 791—798.
14. Feedforward Method of Engine Torque Estimation // IEEE Intern. Conf. on Vehicular Electronics and Safety. 2006. P. 246—249.
15. *Nagata T., Tomizuka M.* Robust Engine Torque Control by Iterative Learning Control // American Control Conf. 2009. P. 2064—2069.
16. *Gerasimov D. N., Javaherian H., Nikiforov V. O.* Data Driven Inverse-Model Control of SI Engines // Proc. American Control Conf. 2011. P. 426—431.
17. *Ginoux S., Champoussin J.* Engine torque determination by crankangle measurements: State of the Art, Future Prospects // SAE Tech. Report № 970532. 1997.
18. *Park S., Sunwoo M.* Torque estimation of spark ignition engines via cylinder pressure measurement // J. Automobile Engineering. 2003. Vol. 217, N 9. P. 809—817.
19. *Герасимов Д. Н., Джавахериан Х., Ефимов Д. В.* и др. Инжекторный двигатель как объект управления. Ч. I. Схема двигателя и синтез математической модели // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2010. № 5. С. 135—147.

**Сведения об авторах**

- Дмитрий Николаевич Герасимов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: gerasimovdn@mail.ru
- Владимир Олегович Никифоров** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, Санкт-Петербург; проректор; E-mail: nikiforov@mail.ifmo.ru
- Алексей Владимирович Парамонов** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: avp.atrax@gmail.com
- Дмитрий Сергеевич Серов** — студент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, Санкт-Петербург; E-mail: dss-primary@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
21.03.14 г.