



УДК 519.876.5

**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****ON ONE METHOD OF SYSTEM-OBJECT IMITATION MODELING OF TECHNICAL  
SYSTEMS****С.И. Маторин<sup>1</sup>, И.А. Егоров<sup>2</sup>, А.Г. Жихарев<sup>3</sup>, С.В. Жеребцов<sup>3</sup>  
S.I. Matorin<sup>1</sup>, I.A. Egorov<sup>2</sup>, A.G. Zhikharev<sup>3</sup>, S.V. Zherebtsov<sup>3</sup>**<sup>1)</sup> Белгородский университет кооперации, экономики и права,  
Россия, 308023, г. Белгород, ул. Садовая, д. 116а<sup>2)</sup> ОА НПП «СПЕЦ-РАДИО», Россия, 308023, г. Белгород, ул. Промышленная, д. 4<sup>3)</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85<sup>1)</sup> Belgorod University of Cooperation, Economics and Law,  
116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia<sup>2)</sup> ST RPE "SPEC-RADIO", 4 Promyshlennaya St., Belgorod, 308023, Russia<sup>3)</sup> Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia

E-mail: zhikharev@bsu.edu.ru

**Аннотация**

В работе рассматривается задача имитационного моделирования процессов функционирования технических систем на примере четырехтактного бензинового двигателя внутреннего сгорания. Построенная имитационная модель представляет собою набор УФО-элементов, которые, в свою очередь, представляют собою отдельные подсистемы двигателя внутреннего сгорания. Логика функционирования отдельных подсистем двигателя реализуется с помощью специального скриптового языка описания функциональных узлов, позволяющего имитировать их работу. На разработанной модели проводятся эксперименты по моделированию сбоев отдельных модулей двигателя.

**Abstract**

The task of imitating modeling of the functioning of technical systems on the example of a four-stroke gasoline internal combustion engine is considered. The constructed simulation model is a set of UFO-elements, which, in turn, are separate subsystems of the internal combustion engine. The logic of the functioning of individual engine subsystems is described with the help of a special scripting language for describing the functional nodes, which makes it possible to simulate their operation. On the developed model, experiments are carried out to model failures of individual engine modules.

**Ключевые слова:** функционирующая система; состояние системы; имитационная модель; динамика системы; графоаналитическое моделирование; «UFOModeler».

**Keywords:** the functioning system; a condition of system; imitating model; dynamics of system; graphic-analytical modeling; «UFOModeler».

**Введение**

Имитационное моделирование позволяет заместить изучаемую систему моделью в определенном виде для исследования ее функционирования. Модель должна воспроизводить свойства изучаемой системы, ее структуру и поведенческие особенности. Моделирование может быть использовано в сфере торговли, логистики, промышленности,



транспорта, обороны, связи и многих других. Потребность в использовании моделирования обычно возникает в тех случаях, когда требуется анализ деятельности, оптимизация деятельности существующей или разрабатываемой системы, когда необходимо принять обоснованное решение, особенно если от данного решения зависят дальнейшие финансовые и трудовые затраты [Жихарев и др., 2016; Маторин и др., 2016; Бузов и др., 2016]. Построить модель и опробовать на ней различные варианты ее функционирования гораздо проще и дешевле, чем проводить эксперименты на реальных объектах. Для целей имитационного моделирования процессов и систем, авторами разработана методика системно-объектного имитационного моделирования, а также программный инструментарий, автоматизирующий данную методику [Zhikharev and other, 2015; Жихарев и др., 2015; Жихарев и др., 2014].

В рамках моделирования динамических систем наибольшую сложность представляет моделирование, учитывающее не только входы, выходы и состояния системы, но и преобразования ее внутренних параметров. При решении прикладных задач моделирования требуется программное средство, использующее принципы и закономерности системного подхода. Рассмотрим методику системно-объектного имитационного моделирования [Zhikharev and other, 2016].

### **Имитационное моделирование функционирования двигателя внутреннего сгорания**

Программный инструментарий системно-объектного имитационного моделирования «UFOModeler» [Жихарев и др., 2015] позволяет значительно облегчить работу по моделированию, анализу и оптимизации технических процессов в которых происходит взаимодействие, в том числе синхронное по функционалу компонентов, одним из таких процессов является функционирование двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Рассмотрим структурные компоненты и процесс работы двигателя. ДВС состоит из следующих подсистем: системы управления подачей топливно-воздушной смеси и её зажигания (воспламенения); шатунно-поршневой группы, передающей крутящий момент на коленчатый вал; системы генерации постоянного тока; системы выпуска отработавших газов.

В ДВС подача воздуха происходит за счет изменения положения дроссельной заслонки. Топливо подается напрямую во впускной коллектор через специальные форсунки топливной рампой. Из впускного коллектора топливно-воздушная смесь поступает в рабочую камеру двигателя. Электронный блок управления контролирует подачу топливно-воздушной смеси, подает сигналы системе зажигания.

Каждый такт работы четырехтактного двигателя составляет один ход поршня в пределах от верхней до нижней мёртвых точек. При этом двигатель проходит через следующие фазы работы: Такт первый, впуск. Поршень совершает движение от верхней к нижней мёртвой точке. В это время внутри цилиндра возникает разрежение, открывается впускной клапан и поступает топливно-воздушная смесь. Такт второй, сжатие. При движении поршня от нижней к верхней мёртвой точке и закрытых впускном и выпускном клапанах происходит сжатие горючей смеси в полости цилиндра. Такт третий, расширение. Топливо-воздушная смесь воспламеняется от электрической искры, произведенной свечой зажигания. Это сопровождается выделением значительного количества тепловой энергии. Под давлением поршень быстро движется к своей нижней мёртвой точке. Такт четвёртый, выпуск. Во время обратного движения поршня к верхней мёртвой точке открывается выпускной клапан, через который выхлопные газы выталкиваются из цилиндра в выпускной коллектор, а затем и в окружающую среду.

Тепловая энергия преобразуется в механическую работу посредством кривошипно-шатунного механизма, передающего энергию движения на коленчатый вал, который в свою очередь передает энергию на маховик и генератор.

Построим с помощью программного инструментария UFOModeler модель процессов на примере функционирования четырехтактного бензинового ДВС с инжекторной подачей топлива.

Создадим модель и назовем ее «Функционирование ДВС», затем создадим узлы – подсистемы двигателя: «Топливная рампа»; «Дроссельная заслонка»; «Впускной коллектор»; «Электронный блок управления»; «Педаль газа»; «Генератор»; «Катушка зажигания»; «Выпускной коллектор».

Создадим узел, отвечающий за работу шатунно-поршневой группы блока цилиндров, и декомпозируем его на составляющие. Создадим узел с именем «Блок цилиндров» и зададим наименование функции «Работа ШППГ». Перейдем к редактированию модели «внутри» узла «Блок цилиндров». Добавим узлы для четырех камер сгорания, коленчатого вала и свечей зажигания.

Следующим этапом необходимо создать связи. Связи – это всевозможные потоки материи или информации, циркулирующие в моделируемой системе и между системой и окружающей средой. Особенностью УФО-подхода, лежащего в основе концепции системно-объектного имитационного моделирования, является то, что в нём существует базовая иерархия связей. Связи, которые используются в модели, добавляются в эту иерархию, расширяя её, т.е. каждая новая связь является подвидом существующей. На рисунке 1 представлен результат добавления связей на общую модель.

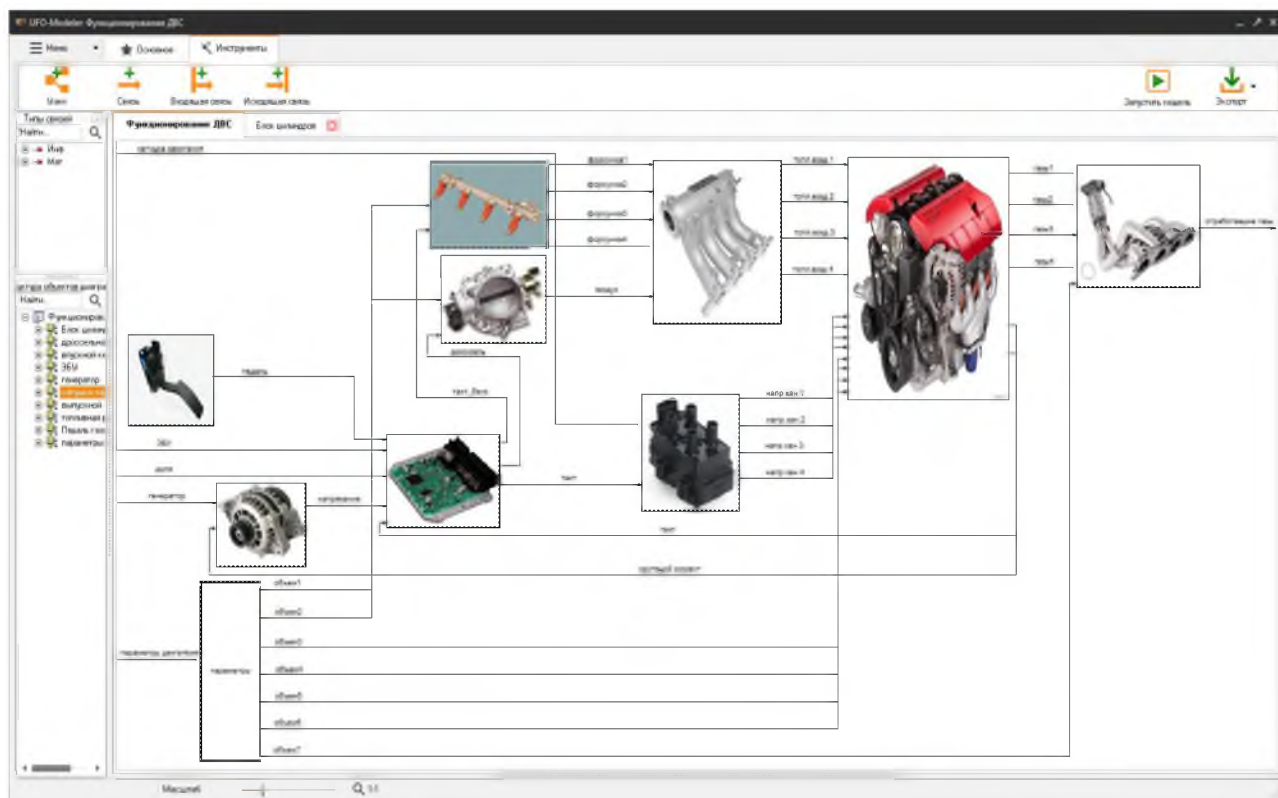


Рис. 1. Структурная модель ДВС  
Fig. 1. Structural model of internal combustion engine

Модель узла «Блок цилиндров» при добавлении входящих и исходящих связей представлен на рисунке 2.

С точки зрения втекающих и вытекающих потоков/связей, каждая система характеризуется функциональными способностями, обеспечивающими преобразование «втекающих» по связям ресурсов в «вытекающие» ресурсы. За обработку входящих и исходящих потоков данных узла отвечает функция, описанная с помощью языка UFO-скрипт с внедрением специальных методов для обработки потоков ввода/вывода данных. Добавим UFO-скрипты для всех подсистем двигателя.

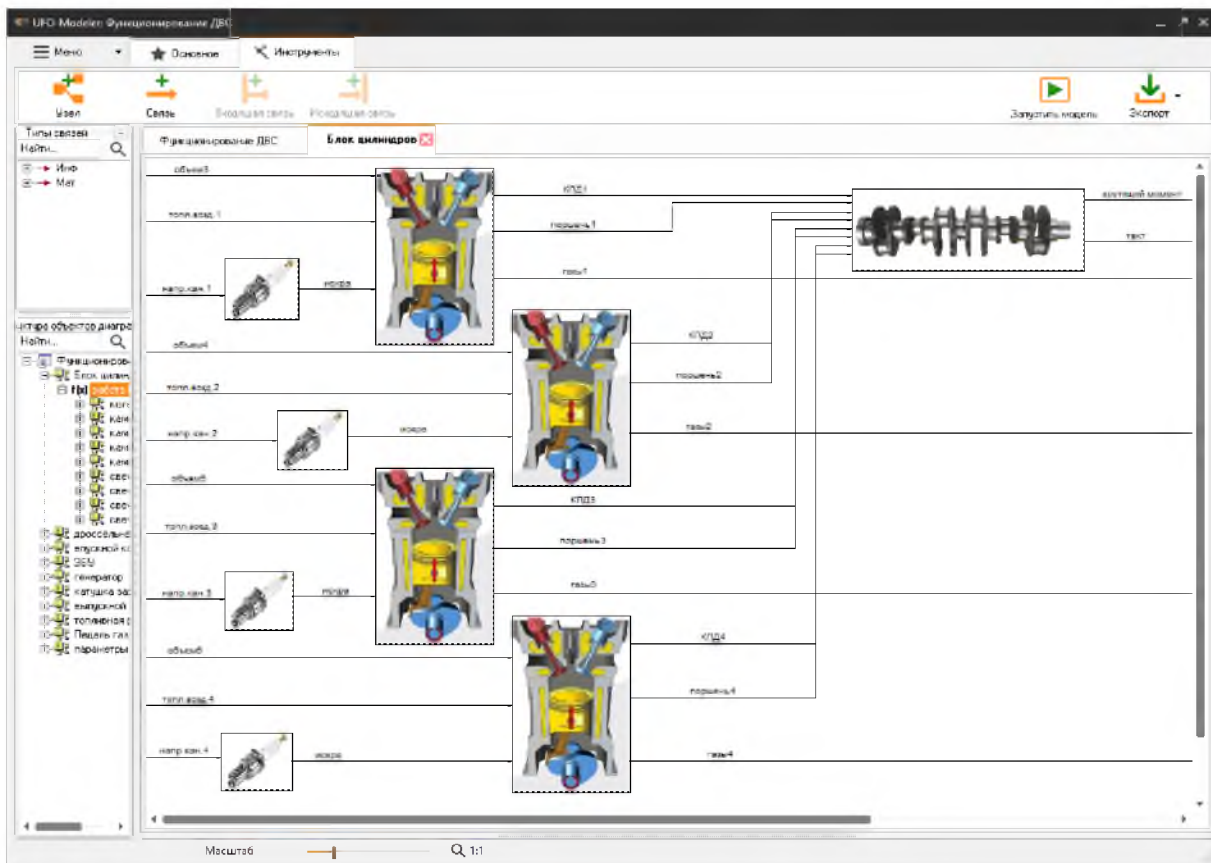
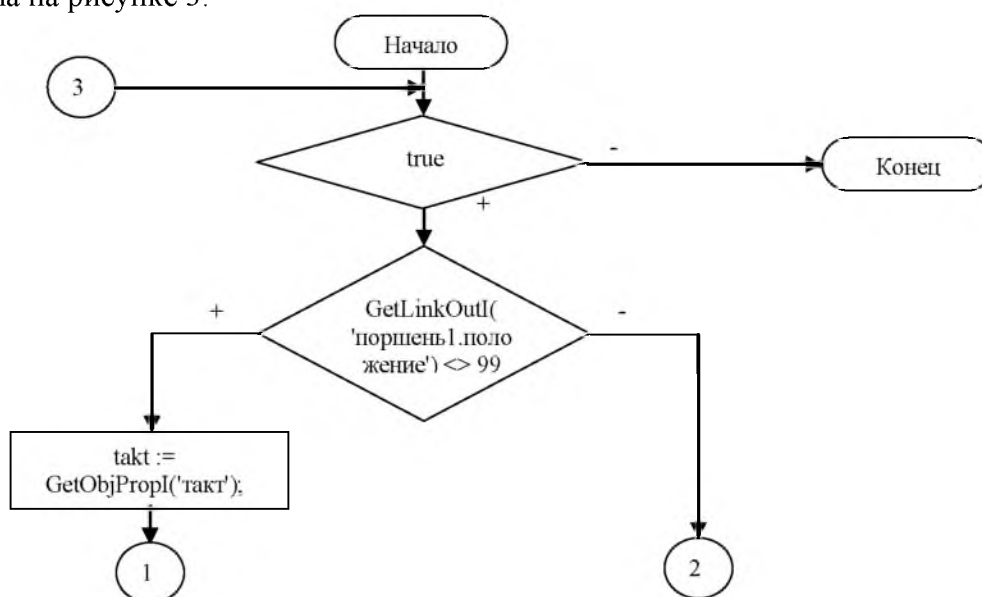


Рис. 2. Модель узла «Блок цилиндров»  
 Fig. 2. Model of the cylinder block assembly

Программный код узла «Камера сгорания 1» представлен в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 3.



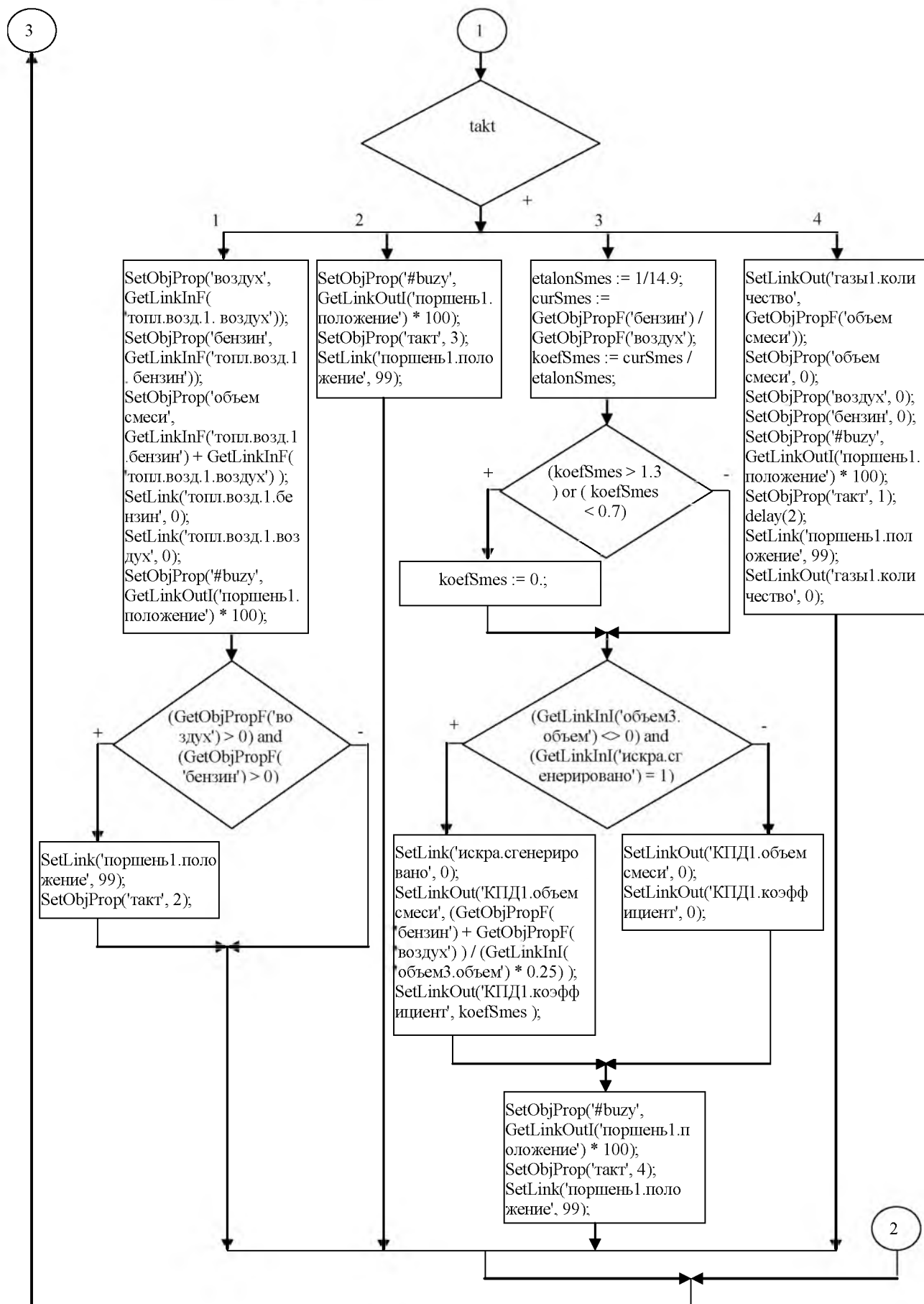


Рис. 3. Блок-схема функции «Камера сгорания 1»  
 Fig. 3. Block diagram of the function «Combustion chamber 1»



Далее необходимо запустить выполнение модели, после чего пользователь увидит процесс работы модели, представленный на рисунке 4.

Красный квадратный индикатор в правом верхнем углу узлов модели свидетельствует о функционировании данной подсистемы. Из модели следует, что все подсистемы ДВС работают исправно.

Таким образом, объект «генератор» получает на вход связь «крутящий момент» и преобразует данную характеристику в «напряжение» на выходе. Объект «Электронный блок управления» является зависимым потребителем тока от узла «генератор». Блок ЭБУ на основе показаний входящей связи «педаль» участвует в формировании управляющих сигналов на своих выходах для сопряженных узлов. Объект «катушка зажигания» подает напряжение на одну из четырех связей при получении сигнала от связи «такт». При этом один из четырех объектов «свеча зажигания» генерирует искру на выходе при получении напряжения от узла «катушка зажигания». Согласно значению параметра связи «дроссель» объект «дроссельная заслонка» открывает заслонку под заданным углом для поступления определенного количества воздуха. Объект «топливная рампа» подает определенное количество бензина из определенной форсунки топливной рампы при получении сигнала от связи «такт\_бенз». Далее объект «впускной коллектор» согласно номеру связи «форсунка» от узла «топливная рампа» смешивает в канале с соответствующим номером бензин с воздухом от узла «дроссельная заслонка». Получившаяся топливно-воздушная смесь подается на выход узла по связи «топл.возд.» с соответствующим номером канала.

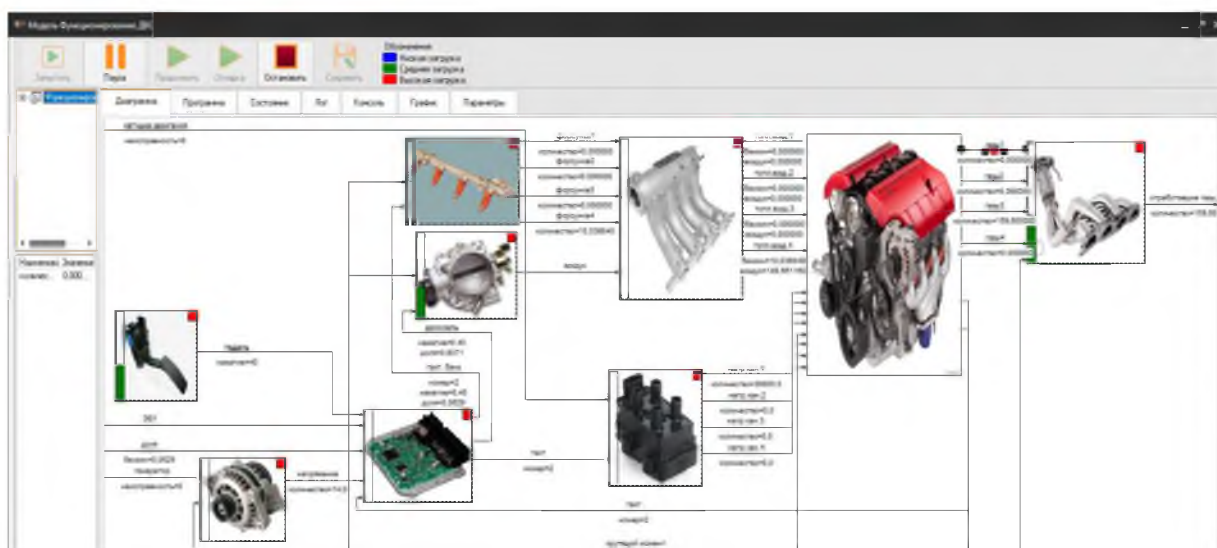


Рис. 4. Функционирование исправной системы

Fig. 4. The right functioning of the system

Каждый из четырех объектов «камера сгорания» с порядковым номером на первом такте работы производит впуск топливно-воздушной смеси по связи «топл.возд.», на втором такте объект производит сжатие и воспламенение смеси с помощью сгенерированной искры от узла «свеча зажигания». На третьем такте на выход узла в связи «КПД» подается значение эффективности сгорания топливно-воздушной смеси в зависимости от заданной пропорции бензина по отношению к воздуху. На четвертом такте происходит выброс отработавших газов на выход узла.

Объект «коленчатый вал», согласно полученному на входе «КПД», преобразовывает энергию на выходе в «крутящий момент». Также данный объект сообщает на выходе о смене тактов шатунно-поршневой системы. Объект «выпускной коллектор» получает на входе количество отработавших газов и эффективно отводит их из ДВС. При этом график крутящего момента исправного ДВС с течением времени изображен на рисунке 5.

Из графика видно, что при манипулировании педалью газа идет равномерный набор и сброс крутящего момента. Проведем эксперимент на полученной модели, который заключается в имитации неисправности работы двигателя. Для этого деактивируем узел «Генератор» с помощью входящей связи «генератор.неисправность».



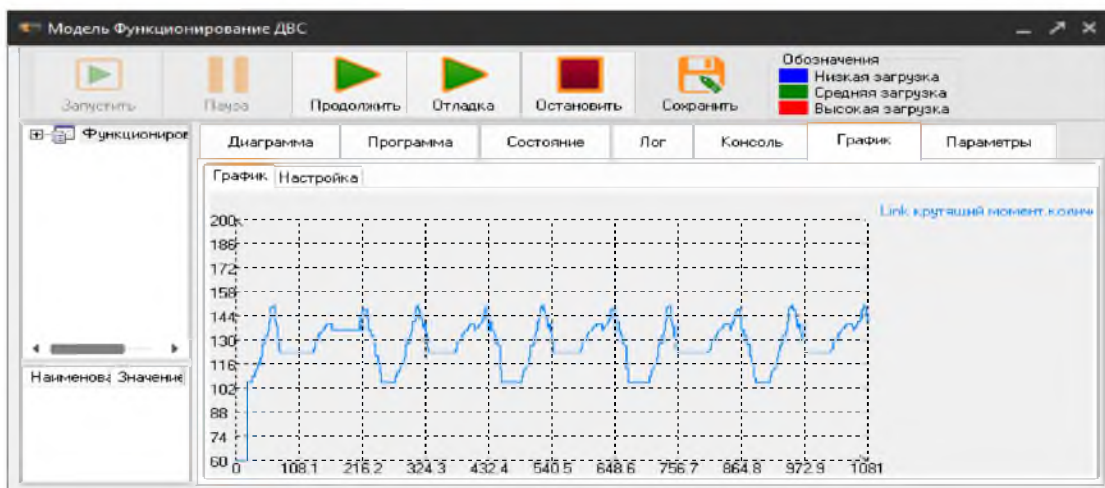


Рис. 5. Крутящий момент исправного двигателя

Fig. 5. Torque of the right functioning engine

На рисунке 6 отражены изменения, произошедшие в функционировании ДВС.

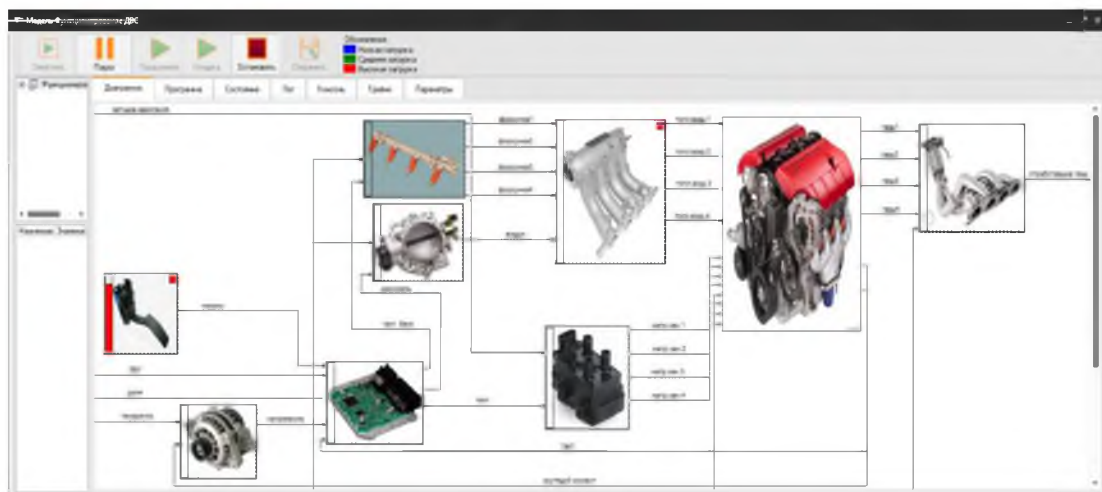


Рис. 6. Функционирование системы без использования генератора

Fig. 6. The functioning of the system without generator

Таким образом, выключение генератора из цепи повлияло на функционирование всех подсистем ДВС. Генератор как источник питания, не выдал ток потребителям, поэтому ЭБУ двигателя не функционирует и в свою очередь не может подать управляющих команд подсистемам «Топливная рампа», «Дроссельная заслонка», «Катушка зажигания». Следовательно, подсистема «Блок цилиндров» не функционирует. При этом график крутящего момента ДВС с неисправным генератором изображен на рисунке 7.

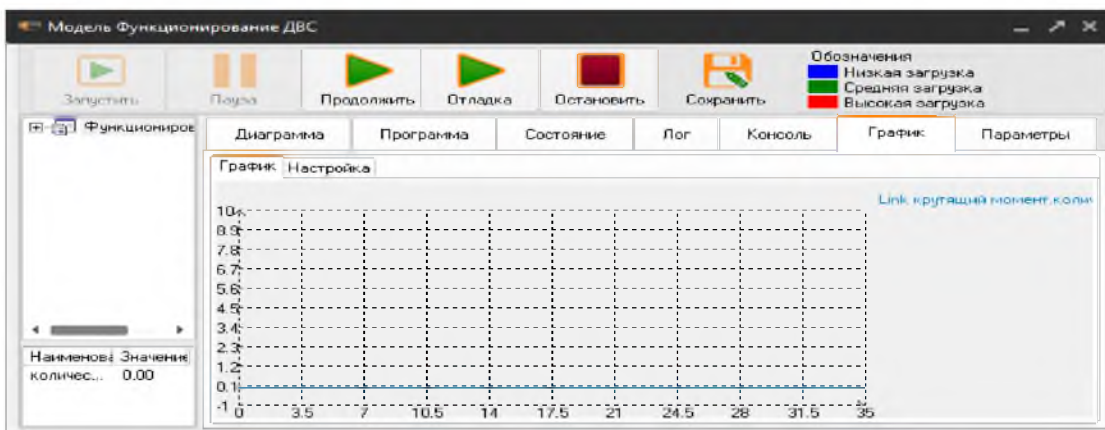


Рис. 7. Крутящий момент с отключенным генератором

Fig. 7. The torque of the engine without generator

Из графика следует, что крутящий момент не наблюдается в случае возникновения данной неисправности. Система находится в состоянии покоя. Для второго эксперимента активируем узел «Генератор» и деактивируем узел «Катушка зажигания» с помощью входящей связи «катушка зажигания.неисправность». На рисунке 8 отражены изменения в функционировании системы.

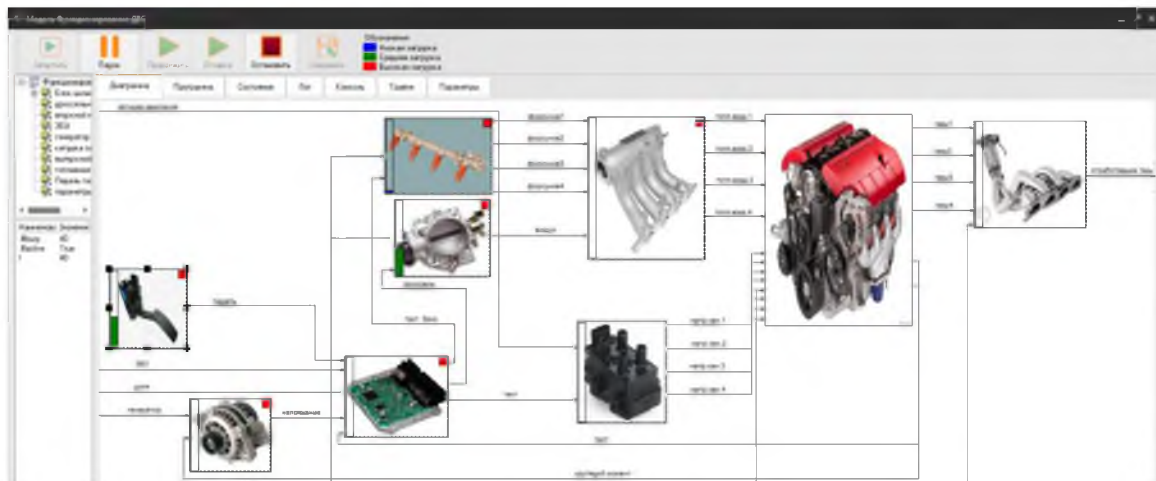


Рис. 8 Функционирование системы с отключенной катушкой зажигания  
 Fig. 8. The functioning of the system with turn off ignition coil

Из модели видно, что все подсистемы кроме катушки зажигания функционируют, так как стартер производит попытку завести двигатель в течение пяти тактов работы блока цилиндров. Но отсутствие тока, поступающего от катушки зажигания на свечу делает невозможным воспламенение топливно-воздушной смеси на втором такте работы блока цилиндров. Коленчатый вал прекращает вращение и выработку крутящего момента, который необходим для функционирования всей системы. Двигатель останавливается. При этом график крутящего момента ДВС с неисправной катушкой зажигания изображен на рисунке 9.

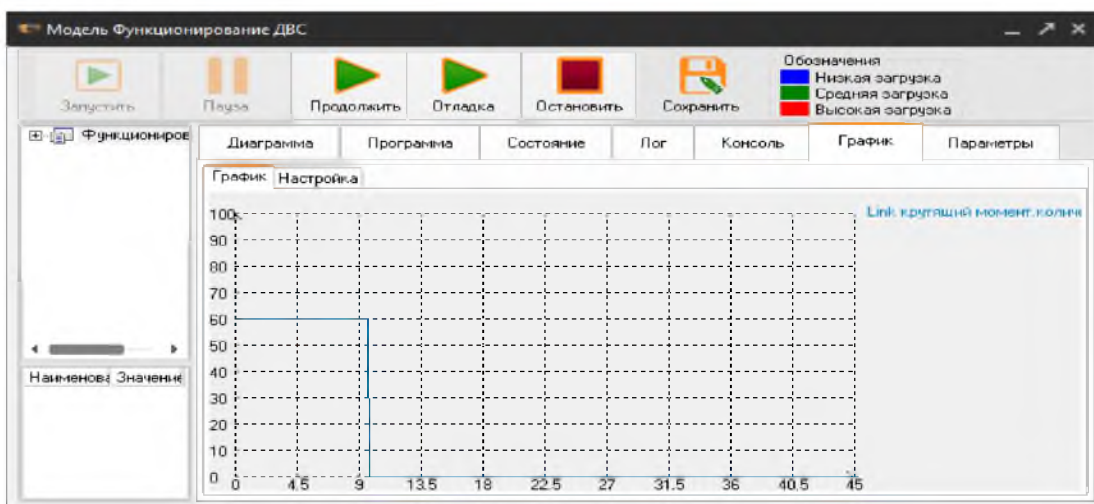


Рис. 9 Крутящий момент с отключенной катушкой зажигания  
 Fig. 9. The torque of the engine with turn off ignition coil

Из графика следует, что крутящий момент наблюдается только на момент работы стартера, что соответствует моделируемому объекту.





### Заключение

Из выше описанного примера моделирования функционирования ДВС можно сделать вывод, что использование представленного программного инструментария позволяет конструировать системно-объектные модели как комбинации УФО-элементов. Язык описания функциональных узлов позволяет описать логику функционирования технической системы, декомпозирую модель до требуемого уровня. На примере модели ДВС показано, что инструмент позволяет строить наглядные и информативные модели процессов и систем, что, в свою очередь, позволяет провести на визуальном уровне анализ функционирования двигателя как единой системы, состоящей из функциональных подсистем.

**Исследования, результаты которых приведены в настоящей статье, выполнены при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 17-07-00289, № 16-07-00460 и № 16-07-00193.**

### Список литературы

#### References

1. Abadi M, Cardelli L. 1996. A Theory of Objects, Springer, Verlag.
2. Diestel R. 2005. Graph Theory. Springer, 410.
3. Kondratenko A.A., Matorin S.I., Zhikharev A.G., Nemtsev A.N., Riabtceva I.N. 2017. Application of logical output means on ontologies to UFO models of subject domains. Journal of Engineering and Applied Sciences. 12(5): 1347-1354.
4. Milner R., Parrow J., Walker D.A. 1989. Calculus of Mobile Processes. Part I. LFCS Report 89-85. University of Edinburgh.
5. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. 2016. The simulation modeling of systems taking into account their internal parameters change. International Journal of Pharmacy & Technology, 8(4): 26933-26945.
6. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. 2015. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object. International Journal of Applied Engineering Research, 10(12): 31363-31370.
7. Алиев Р.А. 1990. Производственные системы с искусственным интеллектом. М., Радио и связь.  
Aliiev R.A. 1990. Production systems with artificial intelligence. M., Radio and Communication (in Russian)
8. Бузов П.А., Жихарев А.Г., Корчагина К.В. 2016. О перспективах имитационного моделирования функционирования систем. Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения-2016», Том 1, Москва, 398.  
Buzov P.A., Zhikharev A.G., Korchagina K.V. 2016. On the prospects of simulation of the functioning of systems. Collected theses of the reports of the XLII International Youth Scientific Conference "Gagarin Readings-2016", Volume 1, Moscow, 398. (in Russian)
9. Гренандер У. 1979. Лекции по теории образов. 1. Синтез образов. М., Мир, 384.  
Grenander U. 1979. Lectures on the theory of images. 1. Synthesis of images. Moscow, Mir, 384. (in Russian)
10. Жихарев А.Г., Болгова Е.В., Гурьянова И.В., Маматова О.П. 2014. О перспективах развития системно-объектного метода представления организационных знаний. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 1(172): 110-114  
Zhikharev A.G., Bolgova E.V., Guryanova I.V., Mamatova O.P. 2014. On the perspectives of the development of the system-object method of representing organizational knowledge. Scientific bulletins of the Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies. 1(172): 110-114 (in Russian)
11. Жихарев А.Г., Зайцева Н.О., Маторин С.И. 2013. О новом графоаналитическом методе имитационного моделирования. Материалы научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии 21 века» (С&Т\*2013), 14-15 мая 2013 г., том 1, 404.



Zhikharev A.G., Zaitseva N.O., Matorin S.I. 2013. On the new graphoanalytical method of imitating modeling Materials of the scientific and technical conference "Cybernetics and High Technologies of the 21st Century" (C & T \* 2013), May 14-15, 2013, Volume 1, 404. (in Russian)

12. Жихарев А.Г., Корчагина К.В., Бузов П.А., Акулов Ю.В., Жихарева М.С. 2016. Об имитационном моделировании производственно-технологических систем. Сетевой журнал Научный результат, серия Информационные технологии. 3(3): 25-31.

Zhikharev A.G., Korchagina K.V., Buzov P.A., Akulov Yu.V., Zhikhareva M.S. 2016. On the simulation of production and technological systems. Network Journal Reserch Result. Information Technology. 3(3): 25-31. (in Russian)

13. Жихарев А.Г., Маторин С.И. 2014. Системно-объектное моделирование технологических процессов. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 21(192): 137-141.

Zhikharev A.G., Matorin S.I. 2014. System-object modeling of technological processes. Scientific bulletins of Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies. 21(192): 137-141. (in Russian)

14. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектное имитационное моделирование транспортных и технологических процессов. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 7(204): 159-169.

Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zaitseva N.O. 2015. System-object simulation of transport and technological processes. Scientific bulletins of the Belgorod State University. History. Political science. Economy. Information technologies. 7(204): 159-169. (in Russian)

15. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектный инструментарий для имитационного моделирования технологических процессов и транспортных потоков. Искусственный интеллект и принятие решений. 4: 95-103.

Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zaitseva N.O. 2015. System-Object Toolkit for Simulation of Technological Processes and Transport Streams. Artificial Intelligence and Decision Making. 84: 95-103. (in Russian)

16. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Маматов Е.М., Смородина Н.Н. 2013. О системно-объектном методе представления организационных знаний. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 8(151): 137-146.

Zhikharev A.G., Matorin S.I., Mamatov E.M., Smorodina N.N. 2013. On the system-object method of representing organizational knowledge. Scientific bulletins of Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies. 8(151): 137-146. (in Russian)

17. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зайцева Н.О., Брусенская И.Н. 2013. Имитационное моделирование транспортных потоков с применением УФО-подхода. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 22(165): 148-153.

Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zaitseva N.O., Brusenskaya I.N. 2013. Simulation modeling of transport streams with application of the UFO approach. Scientific bulletins of Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies. 22(165): 148-153. (in Russian)

18. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. 2016. Системно-объектное моделирование адаптации эволюции экономических систем. Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 4(60): 81-92.

Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. 2016. System-object modeling of the adaptation of the evolution of economic systems. Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law. 4(60): 81-92. (in Russian)

19. Маторин С.И., Попов А.С., Маторин В.С. 2005. Моделирование организационных систем в свете нового подхода «Узел-Функция-Объект». НТИ. Сер. 2. 1: 1-8.

Matorin S.I., Popov A.S., Matorin V.S. 2005. Modeling of organizational systems in the light of the new "Node-Function-Object" approach. STI. Ser. 2. 1: 1-8 (in Russian)

20. Маторин С.И., Попов Э.В. 2002. Анализ и моделирование бизнес-систем: системологическая объектно-ориентированная технология. Харьков, ХНУРЭ, 322.

Matorin S.I., Popov E.V. 2002. Analysis and modeling of business systems: a systemological object-oriented technology. Kharkov. KHNURE, 322. (in Russian)

21. Миронов А.М. 1992. Теория процессов. М., Мир, 472.

Mironov A.M. 1992. The theory of processes. Moscow, Mir, 472. (in Russian)