

Научная статья
УДК 621.43+004.9

Применение современных методов моделирования при создании бесшатунного двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров

Аркадий Васильевич Химченко¹, Николай Иванович Мищенко²,
Татьяна Николаевна Колесникова³

¹ФГБОУ ВО Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I,
Воронеж, Россия

²Автомобильно-дорожный институт Государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»,
Горловка, Россия

³Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры (ПГАСА),
Днепр, Украина

¹himch.arkady@yandex.ru

²mim2802@mail.ru

³kolesnikova.tetiana@pdaba.edu.ua

Аннотация. В работе проведен анализ и выбор методов моделирования конструкции и рабочих процессов нового бесшатунного двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-кулисным механизмом и отключением цилиндров. Показаны некоторые результаты, полученные на данном этапе исследования. Созданные имитационные модели позволили провести предварительные исследования, отладить методологию применения модельного эксперимента, оценить протекание отдельных процессов и определить быстродействие механизма отключения цилиндров, а также внести изменения в конструкцию некоторых узлов двигателя. Наличие имитационных моделей позволяет оптимизировать параметры механизмов и систем двигателя на разных этапах проектирования. Полученные искусственные нейронные сети с высокой точностью распознают режим отключения цилиндров. Выбранный методологический подход позволяет получить имитационную модель верхнего уровня для оценки эффективности разработанного двигателя и разработки системы управления.

Ключевые слова: бесшатунный двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-кулисный механизм, отключение цилиндров, имитационное моделирование.

Для цитирования: Химченко А.В., Мищенко Н.И., Колесникова Т.Н. Применение современных методов моделирования при создании бесшатунного двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Application of modern modeling methods to create the internal combustion engine with connecting rod absent and cylinder deactivation

Arkady V. Khimchenko¹, Nikolay I. Mishchenko², Tat'yana N. Kolesnikova³

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

²Automobile Transport of the Automobile and Highway Institute of the Donetsk National Technical University, Gorlovka, Russia

³Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

¹himch.arkady@yandex.ru

²mim2802@mail.ru

³kolesnikova.tetiana@pdaba.edu.ua

Abstract. The paper analyzes and selects methods for modeling the design and workflows of a new connecting rodless internal combustion engine with a crank-rocker mechanism and cylinder deactivation. Some results obtained at this stage of the study are shown. The created simulation models made it possible to conduct preliminary studies, debug the methodology for applying the model experiment, evaluate the course of individual processes and determine the speed of the cylinder shutdown mechanism, as well as make changes to the design of some engine components. The presence of simulation models allows you to optimize the parameters of the mechanisms and engine systems at different design stages. The obtained artificial neural networks with high accuracy recognize the mode of turning off the cylinders. The chosen methodological approach makes it possible to obtain a top-level simulation model for evaluating the efficiency of the developed engine and developing a control system.

Keywords: connecting rodless internal combustion engine, crank-rocker mechanism, cylinder deactivation, simulation modeling.

For citation: Khimchenko A.V., Mishchenko N.I., Kolesnikova T.N. Application of modern modeling methods to create the internal combustion engine with connecting rod absent and cylinder deactivation. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Введение

На сегодняшний день одним из самых существенных стимулов для развития автомобильной промышленности являются ужесточающиеся нормы безопасности, к которым относится экологическая безопасность транспортных средств. Инженеры и исследователи ведущих автопроизводителей за последние 40 лет совместно с химиками, определяющими технологии изготовления топлив, добились множества

существенных результатов. Так, например, сегодня уже практически не идёт речь о выбросах СО или СН. Путём совершенствования рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) совместно с применением каталитических нейтрализаторов эти выбросы практически сведены к нулю. В данный момент пока ещё не решены проблемы с выбросами оксидов азота NO_x , в частности в дизельных двигателях это представляет собой определённую проблему. Для специалистов очевидно, что CO_2 не является независимым компонентом и тем более токсичным газом. Говорить о том, что, снижая CO_2 , снижают токсичность было бы некорректно. Количество оксида углерода в отработавших газах напрямую зависит от количества израсходованного топлива. Если не рассматривать спорные теории глобального потепления, то снижение CO_2 в ездовом цикле практически определяет снижение расхода топлива автомобилем. Таким образом, новые автомобильные двигатели должны отвечать всё более жёстким требованиям по топливной экономичности.

Совершенствование рабочего процесса требует появления новых конструкций отдельных узлов и механизмов в двигателе внутреннего сгорания. Как правило, автопроизводители редко далеко уходят от отработанных конструкций и вводят принципиально новые элементы в ограниченных количествах. Это позволяет уменьшить затраты времени и средств на совершенствование и отработку конструкции двигателя и в более короткие сроки перейти к массовому производству.

Создание и доведение принципиально новых конструкций двигателей затягивается во времени, а в отдельных случаях не позволяет дойти до серийного образца. Так, например, двигатель с переменной степенью сжатия компании Saab [1] или французский MCE5 [2, 3] не увидели серийного производства до настоящего времени. Непроработанная в полной мере конструкция на этапе экспериментального образца может остановить или затормозить реализацию принципиально правильной идеи. Поэтому на

современном этапе развития компьютерной техники и различных методов моделирования необходима максимальная проработка конструкции и рабочих процессов новых нетрадиционных двигателей. Помощь в этом может оказать модельно-ориентированный подход в проектировании.

Одной из конструктивных схем, создающих перспективы реализации регулирования степени сжатия или отключения цилиндров путём остановки поршней, является разработанный в АДИ ДОННТУ двигатель с кривошипно-кулисным механизмом (ККМ) преобразования движения поршня [4].

В данной работе ставилась *цель* проанализировать и определить те методы моделирования, которые отвечают задачам комплексной проработки в минимальные сроки конструкции и рабочих процессов, происходящих в новом бесшатунном двигателе, вплоть до реализации его системы управления и получения оценки полученного эффекта от усовершенствований.

Материалы и методы

Разработка принципиально новой конструкции двигателя внутреннего сгорания, несмотря на новизну, опирается на уже известные рабочие процессы и конструктивные решения. Поэтому следует различать вопросы, требующие глубокой проработки и те, решение которых может быть получено на основе уже известных результатов и методов из смежных инженерных и научных отраслей.

При создании двигателя внутреннего сгорания первым важным пунктом является рабочий процесс в цилиндре двигателя.

Принципиально схема двигателя в кривошипно-кулисным механизмом – это обычный поршневой двигатель, имеющий меньшие механические потери и вследствие другой кинематики несколько улучшенный рабочий процесс. Поэтому глубокое изучение рабочего процесса, например, его моделирование методами цифровой гидродинамики или с помощью многозональных моделей турбулентного сгорания не представляется

необходимым. Кроме того, такие методы достаточно ресурсоемки как в отношении вычислительных мощностей, так и времени моделирования. Исключение могут составлять случаи, когда на основе конструкторской разработки достигнут результат, позволяющий реализовать принципиально новый вариант рабочего процесса. Это возможно при реализации двигателя с переменной степенью сжатия для осуществления воспламенения от сжатия гомогенной бензиновой смеси. Такое воспламенение наблюдалось при проведении экспериментальных исследований в двухтактном варианте бесшатунного двигателя с переменной степенью сжатия. Более глубокое изучение процесса сгорания с воспламенением от сжатия наиболее активно изучается на протяжении последних 20–25 лет [5, 6]. Но реализация таких методов воспламенения смеси обычно рассматривается на базе уже отработанных конструкторских решений. Его моделирование в двигателе принципиально новой конструкции представляется нецелесообразным.

В случае реализации отключения части цилиндров рабочий процесс в работающих цилиндрах бесшатунного двигателя существенно не отличается от классического, поэтому могут быть реализованы менее ресурсоемкие модели. Однако одним из важных аспектов разработки современных сложных технических систем является наличие таких компьютерных моделей, которые позволят в кратчайшие сроки разработать систему управления нетрадиционного двигателя. Для этого нужны динамические модели высокого уровня, имеющие приемлемую скорость моделирования. Модели высокого уровня не всегда в полной мере могут отвечать задачам исследования. Так, используемые для моделирования при проектировании систем управления автомобиля модели двигателей выдают только внешние показатели работы ДВС, такие как эффективная мощность, эффективный крутящий момент и расход топлива. В случае с отключением цилиндров, модель должна основываться на показателях отдельного цилиндра, а в рассматриваемом варианте исследования рабочих процессов в механизмах

двигателя с ККМ необходимо знать давление в цилиндре, силы инерции и т.д. Таким образом, опускаясь к моделированию на более низком уровне, для исследовательских и проектных целей целесообразно остановиться на описании рабочих процессов в цилиндре системой дифференциальных уравнений, непрерывных во времени [7]. Такой классический вариант может быть компромиссным, позволяет реализовать имитационное моделирование и отвечает названным выше требованиям. Важным аспектом любого метода имитационного компьютерного моделирования является проверка и подтверждение адекватности модели. Но на этом вопросе остановимся позже.

Следует заметить, что применение на отдельных этапах низкоуровневых моделей для уточнения параметров, например процессов газообмена, не исключено, но такие исследования можно считать независимыми и результаты должны быть встроены в модели более высокого уровня.

Вторым пунктом, на котором следует остановиться, является исследование рабочих процессов в технической системе, которой и является двигатель. Очевидно, при рассмотрении новых конструкций важно понять взаимодействие отдельных элементов, возникающие силы и временные рамки протекания процессов взаимодействия. Например, при отключении цилиндра остановкой поршня будет происходить разрыв кинематической связи в ККМ и при этом важно знать время, в течение которого будет протекать переходный процесс остановки поршня либо его подключения.

Современные математические методы и программные продукты позволяют выполнить геометрическое моделирование деталей и узлов механизма и рассчитать методами конечных элементов напряжения и деформации, возникающие в узле. Но моделирование разрыва кинематических связей в доступных продуктах проблематично. Кроме того, объединение различных систем в рамках одной модели тоже зачастую невозможно. Метод конечных элементов относится к низкоуровневым. Он весьма специализированный и ресурсозатратный. Конечно, он может

применяться на этапе топологической оптимизации детали или для анализа прочности. Но для анализа прочности предварительно необходимо получить информацию по воздействию сил. Для исследования системы в целом рассматривать этот метод нецелесообразно. В данном случае лучше использовать системы твердотельного моделирования. При этом количество вычислительной работы снижается в связи с упрощением моделей.

Исходя из поставленных целей, в частности оценки получаемого эффекта и создания условий для разработки системы управления, модель должна быть комплексной и имитационной. Такие модели могут быть созданы в среде Matlab Simulink. Важной особенностью данного программного обеспечения является объединение большого числа математических методов для решения общих и специализированных инженерных и научных задач.

Применение подобных продуктов позволяет смоделировать на различных уровнях рабочие процессы во всех интересующих системах. Так были получены имитационные модели 4-цилиндрового двигателя с кривошипно-кулисным механизмом, привода механизма отключения цилиндров, взаимодействия деталей в замке механизма отключения и др. Такие модели уже на предварительном этапе исследований позволили оценить ряд важных моментов в работе механизмов и систем. Но это обсудим ниже.

Важным аспектом моделирования является оценка адекватности модели. Чем сложнее модель, тем сложнее получить универсальные зависимости, работающие во всех условиях. Часто в моделях имеются параметры, влияющие на ее поведение, но однозначное определение которых невозможно. Так, например, достаточно сложно описать параметры механических потерь в двигателе. Отдельные элементы в каких-то конструктивных исполнениях изучены достаточно хорошо. Однако перенести такие модели на новый двигатель без внесения изменений и корректировок невозможно. Часто создание сложных моделей и зависимостей отдельных элементов не является необходимостью. Для

имитационных моделей применяют калибровку, как процесс настройки параметров модели на основе экспериментальных данных [8, 9]. Ее задача получить симуляцию с минимальным отклонением от наблюдаемых значений. Как правило это требует значительных затрат на эксперименты, наличия современного экспериментального оборудования и программного обеспечения, что часто не доступно для нашей академической науки.

В практике моделирования работы систем управления используются методы идентификации модели [10–12]. В сущности, это подбор параметров с помощью методов оптимизации и планирования экстремального эксперимента. При идентификации модели на основе имеющихся данных или полученных специально при экспериментальных исследованиях проводится оптимизация параметров, влияющих на работу модели для приближения результата моделирования к экспериментальным данным. Методы идентификации по своей сути идентичны калибровке модели и отличаются в зависимости от задач и используемых математических моделей. Важно, что при идентификации часть процессов может быть описана уравнениями, не имеющими отношения к физической сути описываемого явления, но при этом давать надежный результат.

После такой настройки модели необходимо выполнить ее проверку на адекватность. В практике моделирования и программирования эта процедура называется валидацией.

Следует обратить внимание на то, что для получения адекватной модели идентификация должна проводиться на данных, отражающих различные режимы работы объекта моделирования. Кроме того, часть данных, не участвующая в идентификации, должна быть использована для верификации модели. Таким образом, методы идентификации и оптимизации являются неотъемлемой частью методологии разработки двигателя перспективной конструкции.

Отдельно следует остановиться на применении искусственного интеллекта. Сами по себе искусственные нейронные сети это один из типов моделей, требующих применения методов идентификации. Здесь не имеет смысла выделять какие-то отдельные методы, связанные с обучением или типами сетей. В различных задачах могут применяться различные искусственные нейронные сети от сетей прямого распространения до глубоких RNN или свёрточных, а при обучении применяют разные методы, лежащие в основе алгоритмов: обратного распространения ошибки, обучения с подкреплением и других. Важным является то, что искусственные нейронные сети принципиально, решая свои типичные задачи регрессии и классификации, могут быть применены для повышения скорости вычислений при моделировании и отладке моделей высокого уровня в процессе подготовки и разработки системы управления в качестве суррогатных моделей систем двигателя.

Список перечисленных выше методов естественно не является исчерпывающим и представляет, на наш взгляд, ту основу, которая позволяет достаточно быстро добиться приемлемого результата при разработке двигателя новой конструкции с отключением цилиндров: создать имитационные модели для исследования и отладки отдельных узлов и механизмов и объединить их в общую модель двигателя для оценки эффективности разработки и создания системы управления двигателем.

Результаты и обсуждение

Описанный методологический подход был во многом уже реализован авторами данной работы и продолжает реализовываться в настоящее время.

Имитационные твердотельные модели бесшатунного 4-цилиндрового двигателя с ККМ в Simulink Simscape (рис. 1, 2) позволили определить вибрацию на опорах экспериментального образца [13], изучить ее источники и внести конструктивные изменения. Методы идентификации и оптимизации

позволили обеспечить качественное уравнивание экспериментального образца двигателя от сил инерции (рис. 3).

Как видно из графиков на рис. 3 после уравнивания модели силы инерции не значительны. Максимальные значения определяются точностью, установленной при моделировании и идентификации.

Особенностью отключения цилиндров в двигателе с кривошипно-кулисным механизмом является наличие механизма, размыкающего силовое взаимодействие штока и кулисы.

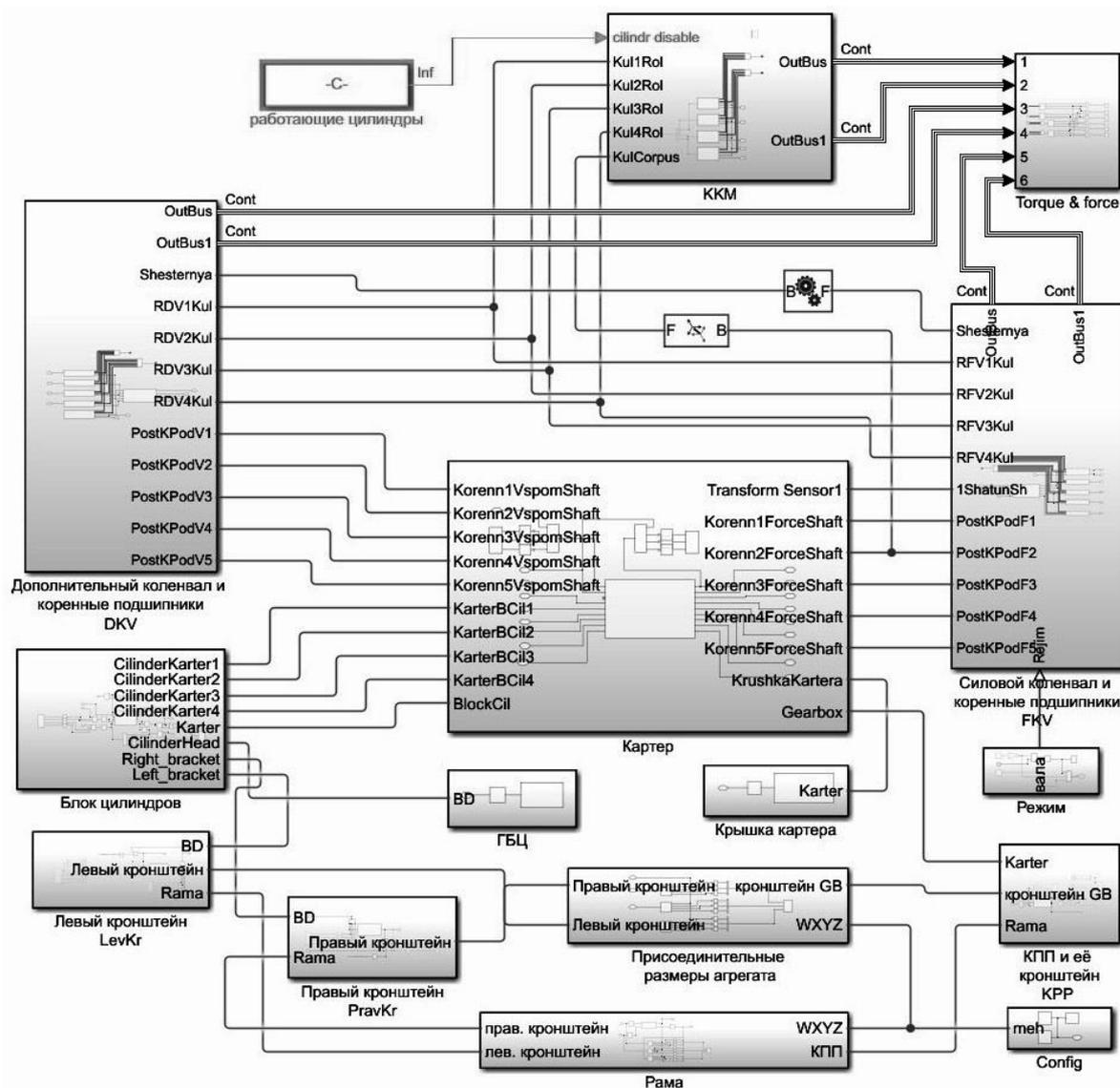


Рис.1. Модель Simulink 4-цилиндрового двигателя с KKM

К данному механизму разработан гидравлический привод с электромагнитным управлением. Моделирование работы привода позволило оценить его быстродействие при питании от штатной системы смазки двигателя [14]. Детальное рассмотрение процессов в органах управления гидравлическим приводом дало возможность оперативно внести изменения в его конструкцию.

Имитационные модели позволили выявить возможные риски для работы системы смазки при такой схеме подключения [15]. При этом при создании модели системы смазки не ставилась цель её полной идентичности. Параметры отдельных элементов обобщенной модели системы были получены с помощью идентификации на основе диагностических параметров завода-изготовителя прототипа.

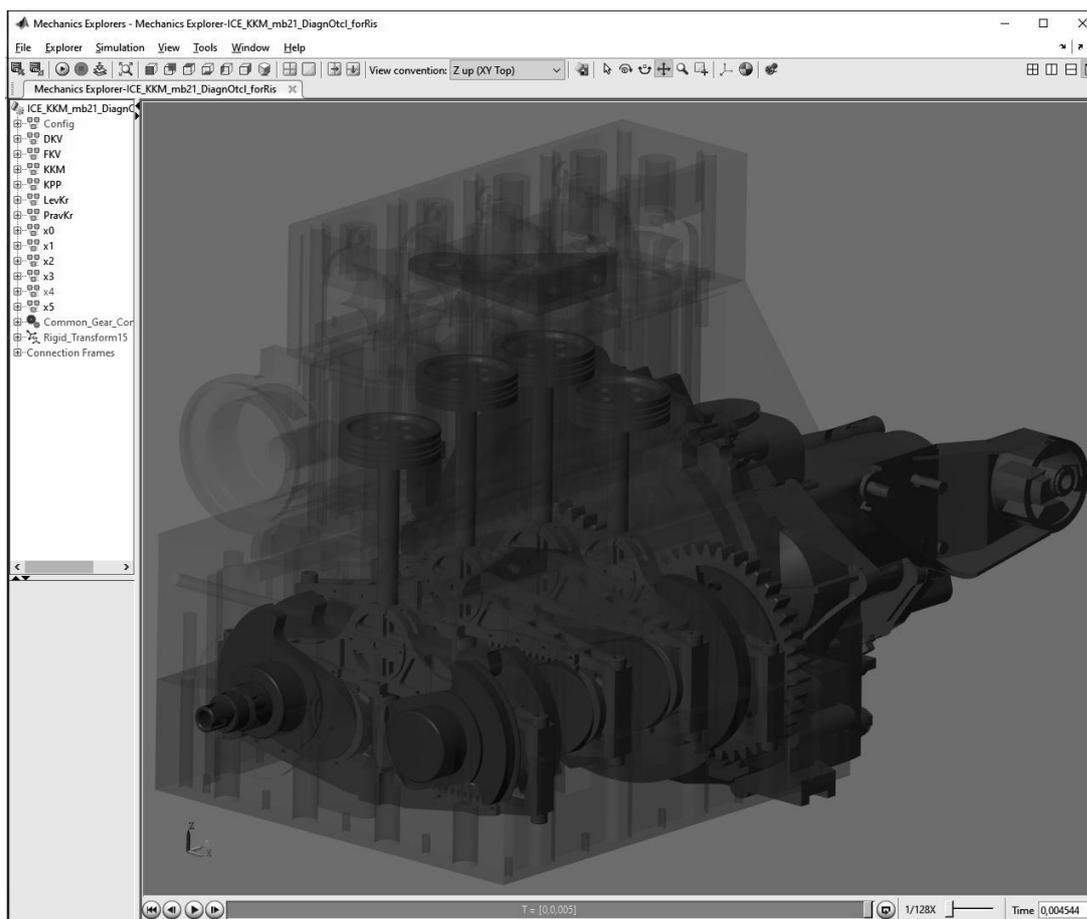


Рис. 2. Визуализация моделирования работы 4-цилиндрового двигателя с ККМ и отключением цилиндров

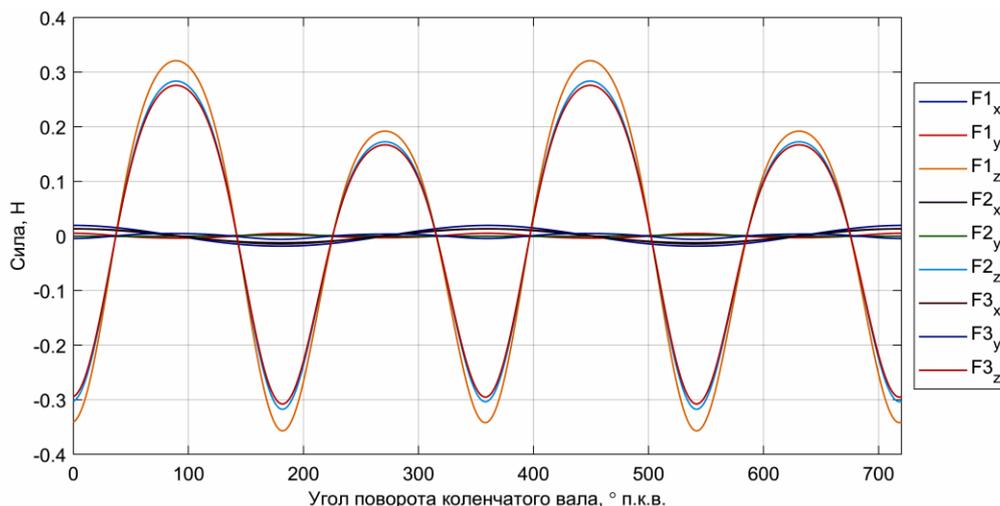


Рис. 3. Остаточные силы инерции на опорах двигателя с ККМ после уравнивания модели

Механизм отключения цилиндров такого рода в традиционных двигателях не применяется и рабочие процессы не имеют численных оценок даже в первом приближении. Поэтому потребовались модели на более низком уровне. Полученная модель контактного взаимодействия элементов фиксатора и штока позволила более точно оценить моменты остановки поршня в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов (рис. 4).

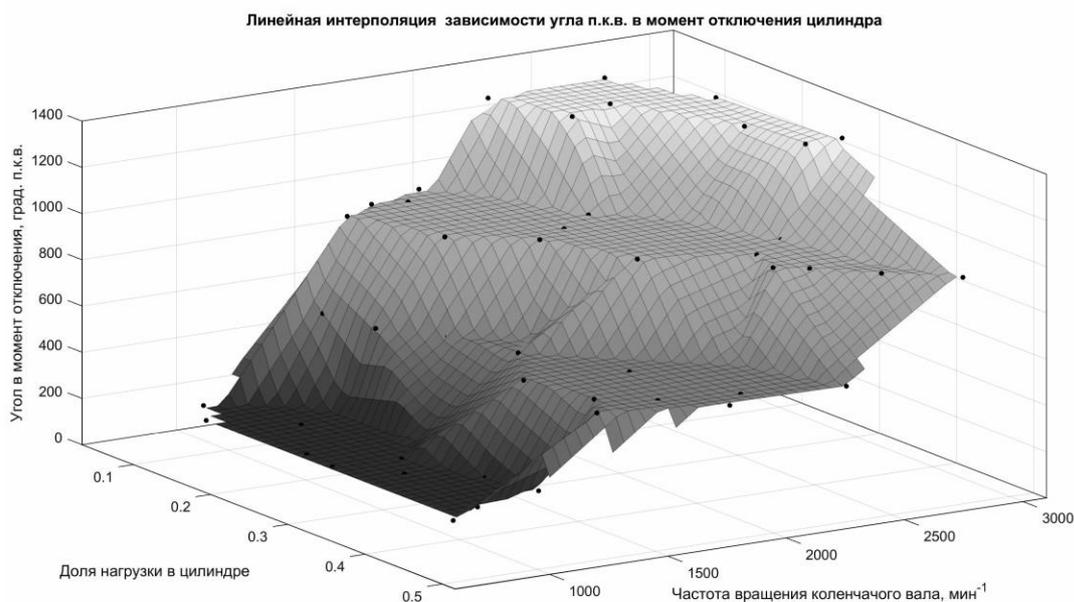


Рис. 4. Результаты моделирования остановки поршня

Моделирование рабочего процесса на основе законов сохранения энергии и массы [7] также занимает значительное время и существенно может замедлить моделирование при встраивании этой модели в другие. Для исследования работы привода механизма отключения и времени отключения использовалась суррогатная модель на основе нейронной сети. Применение искусственных нейронных сетей как суррогатных моделей позволило сократить время моделирования на несколько порядков.

Анализ возможности применения искусственного интеллекта в системе самодиагностики двигателя с отключением цилиндров позволил получить агрегированную RNN сеть (рис. 5), которая с высокой точностью по датчикам на опорах двигателя может распознавать режим работы и определять, какие цилиндры отключены в данный момент (рис. 6). Погрешность определения режима не превышала 0,008 %.

В целом результаты проведенной на данный момент работы и перспектива ее продолжения позволяют утверждать, что выбранный методологический подход верен.

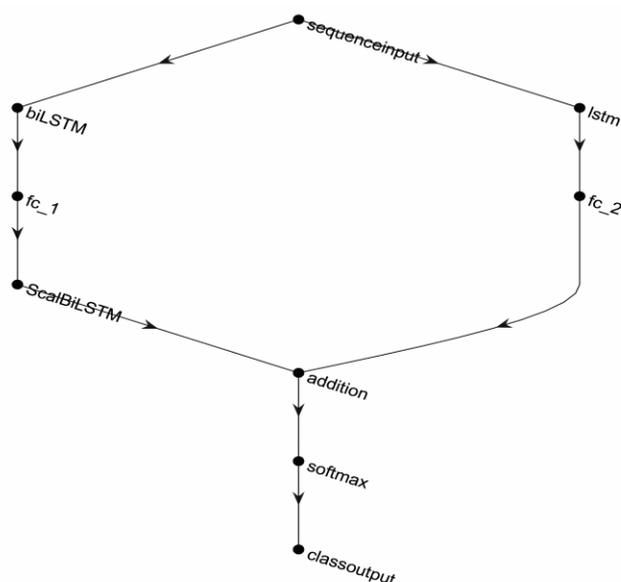


Рис. 5. Архитектура агрегированной сети, объединяющей обученные искусственные нейронные сети топологии LSTM и BiLSTM

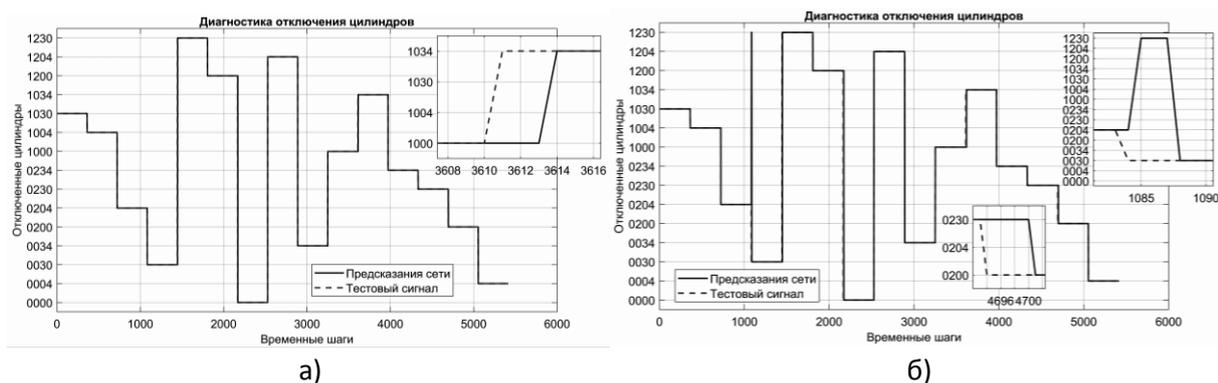


Рис. 6. Ошибки при диагностике отключения цилиндров:

а – при вводе последовательности данных; б – при потоковой оценке сигнала

Заключение

Проведенный анализ позволил выделить основные методы, перспективные для моделирования разрабатываемого двигателя новой конструкции с отключением цилиндров: для получения имитационных моделей, исследования и отладки отдельных узлов и механизмов, получения модель двигателя верхнего уровня для оценки эффективности разработки и создания системы управления.

Созданные на данном этапе модели позволили провести предварительные исследования, отладить методологию применения модельного эксперимента, оценить протекание отдельных процессов и внести изменения в конструкцию отдельных узлов и механизмов двигателя, определить быстродействие механизма отключения цилиндров.

Результаты показывают перспективу дальнейшего использования имитационного моделирования для всестороннего исследования двигателя новой конструкции.

Список источников

1. Saab представляет уникальную концепцию двигателя, обеспечивающую высокую производительность и низкий расход топлива. – 05.04.2001. – URL: <http://www.saabnet.com/>
2. MCE-5 VCRi: Отодвигаем границы снижения расхода топлива. – 2015. – URL: <http://www.mce-5.com/>

3. Дюшемен, М. Оптимизация профиля зубьев двухречного механизма в MCE-5 VCRi / М. Дюшемен, В. Колли // International Gear Conference 2014: 26–28 августа 2014, Лион. – Эльзевир, 2014. – С. 55–64. — DOI: 10.1533/9781782421955.55
4. Новый бесшатунный двигатель для автомобиля / Н.И. Мищенко, А.В. Химченко, Ю.В. Юрченко [и др.] // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 31 января 2019 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. – С. 383-396.
5. Дуань, Х. Обзор стратегий управления моментом зажигания и фазой сгорания в двигателе с воспламенением от сжатия с однородным зарядом (HCCI) / Х. Дуань [и др.] // Топливо. – 2021. – Т. 285. – С. 119142. – DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119142.
6. Бенду, С. Воспламенение при сжатии гомогенного заряда (HCCI): приготовление смеси и стратегии управления в дизельных двигателях / Х. Бенду, С. Муруган // Обзоры возобновляемой и устойчивой энергетики. – 2014. – Т. 38. – С. 732–746. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.019.
7. Химченко, А.В. Модель рабочего процесса бензинового двигателя для исследования нетрадиционных двигателей / А.В. Химченко [и др.] // Серия конференций ИОР: Науки о Земле и окружающей среде. – 2021. – Т. 659. – № 1. – С. 012074. – DOI: 10.1088/1755-1315/659/1 /012074
8. Абрахам, М.Т. Моделирование селевых потоков 2D (DFS 2D): Численное моделирование селевых потоков и калибровка параметров трения / Абрахам М.Т. [и др.] // Журнал горной механики и геотехнической инженерии. – 2022. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.01.004.
9. Гуанг, Дж. Влияние новой конфигурации с плавно регулируемой степенью сжатия (CVCR) в сочетании с режимом сгорания с искровым зажиганием (SAI) на рабочие характеристики двигателя с искровым зажиганием / Дж. Гуанг [и др.] // Прикладная теплотехника. – 2021. – Т. 197. – с. 117410. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117410.
10. Шёберг, Дж. Нелинейное моделирование черного ящика в системной идентификации: единый обзор / Й. Шёберг [и др.] // Автоматика. – 1995. – Т. 31. – № 12. – С. 1691-1724. – DOI: 10.1016/0005-1098(95)00120-8
11. Касс, Р.Е. Численные методы безусловной оптимизации и нелинейные уравнения / Касс, Р.Е. Деннис Дж. Э., Шнабель Р. Б. // Журнал Американской статистической ассоциации. – 1985. – Т. 80. – № 389. – С. 247. – DOI: 10.2307/2288097
12. Юнг, Л. Моделирование динамических систем. – Энглвуд Клиффс, Нью-Джерси: ПТР Прентис Холл, 1994. – ISBN 0135970970
13. Химченко, А.В. Воздействие сил инерции на кузов автомобиля при отключении цилиндров остановкой поршня в экспериментальном двигателе / А.В.

Химченко, Н. И. Мищенко // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 442-456.

14. Предварительная оценка возможности использования системы смазки серийного двигателя для питания гидропривода механизма остановки поршня / А. В. Химченко, Н. И. Мищенко, Д. А. Дрючин [и др.] // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2021. – № 1(36). – С. 15-26.

15. Химченко, А.В. Возможные риски в эксплуатации бензинового двигателя с механизмом отключения цилиндров и питанием гидропривода механизма из системы смазки / А.В. Химченко, Н.И. Мищенко // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 301-307.

References

1. URL: <http://www.saabnet.com/>
2. URL: <http://www.mce-5.com/>
3. Duchemin M., Collee V. *International Gear Conference 2014*, Lyon, Elsevier, 2014, pp. 55–64.
4. Mishchenko N.I., Khimchenko A.V., Yurchenko Yu.V., Suprun V.L. Kolesnikova T.N. *8-Ye Lukaninskiye chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa*, Moscow, MADI, 2019, pp. 410–422.
5. Duan X., Lai M.-Ch., Jansons M., Guo G., Liu J. *Topливо*, 2021. vol. 285. P. 119142.
6. Bendu H., Murugan S. *Obzory vozobnovlyayemoy i ustoychivoy energetiki*, 2014, vol. 38, pp. 732-746.
7. Khimchenko A.V., Mishchenko N.I., Kolesnikova T.N., Suprun V.L. , Yurchenko Yu.V. *Seriya konferentsiy IOP: Nauki o Zemle i okruzhayushchey srede*, 2021, vol. 659, no. 1, pp. 012074.
8. Abraham M.T., Satyam N., Pradhan B., Tian H. *Zhurnal gornoj mekhaniki i geotekhnicheskoy inzhenerii*, 2022.
9. Guan J., Liu J., Duan X., Jia D., Li Y., Yuan Z., Shen D. *Prikladnaya teplotekhnika*, 2021, vol. 197, pp. 117410.
10. Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L., Benveniste A., Delyon B., Glorennec P.-Y., Hjalmarsson H., Juditsky A. *Automatica*, 1995, vol. 31, no. 12, pp. 1691-1724.

11. Kass, R.E. Dennis J.E., Schnabel R. B. Zhurnal Amerikanskoj statisticheskoy assotsiatsii, 1985, v. 80, no 389, pp. 247.
12. Ljung L. *Modelirovaniye dinamicheskikh sistem* (Modeling of dynamic systems), Englewood Cliffs, New Jersey, PTR Prentice Hall, 1994.
13. Khimchenko A.V., Mishchenko N.I. 9-ye Lukaninskiye chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Moscow, 2021, MADI, pp. 442–456.
14. Khimchenko A.V., Mishchenko N.I., Dryuchin D.A., Mamontov V.R., Savchuk O.V. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo institute*, 2021, no. 1(36), pp. 15–26.
15. Khimchenko A.V., Mishchenko N.I. Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta: Sbornik nauchnykh trudov, posvyashchenny 85-letiyu kafedry EATiS MADI, po materialam 79-y nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoy konferentsii MADI, Moscow, MADI, 2021, pp. 301-307.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Химченко Аркадий Васильевич, канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ.

Мищенко Николай Иванович, д-р. техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ».

Колесникова Татьяна Николаевна, канд. техн. наук, доц., Приднепровская ГАСА.

Information about the authors

Khimchenko Arkady V., Ph.D., Associate Professor, Voronezh SAU.

Mishchenko Nikolay I., Dr. Sc., professor, Automobile and Road Institute "DNTU".

Kolesnikova Tat'yana N., Ph.D., Associate Professor, Prydniprovskya SACEA.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 22.03.2023.

The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 22.03.2023.