

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ВИБРОКОЛЕБАНИЙ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Гриценко<sup>1</sup>, В.Д. Шепелев<sup>1</sup>, А.Ю. Бурцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Белово, Россия

Работоспособность и эффективность работы двигателей существенно зависят от периодической диагностики их технического состояния. В настоящее время обнаружение повреждений на основе вибрации (измерение вибрационных характеристик конструкций и механизмов) является перспективной областью исследовательской деятельности. Рассмотрены особенности контроля и диагностики двигателей внутреннего сгорания с помощью виброакустического анализа. В статье разработан способ определения основных неисправностей газораспределительного механизма (ГРМ) (герметичность сопряжения «клапан–седло», тепловой зазор в приводе клапана, фазы открытия и закрытия клапанов), заключающийся в измерении и анализе виброакустических импульсов, вызванных работой отдельных элементов двигателя. В качестве параметров сигналов используется максимум амплитуды (пик) и момент возникновения виброимпульсов. За опорный сигнал ВМТ поршня исследуемого цилиндра принимается виброимпульс от соударения поршня об упругий наконечник, помещенный в камеру сгорания. Частота вращения коленчатого вала до  $600 \text{ мин}^{-1}$  (что не превышает частоту прокрутки стартером) не приводит к появлению опасных напряжений ни в одном из элементов двигателя и приспособления. При этом наконечник из Vflex пластика, как самый податливый элемент, может быть многократно использован. Для обеспечения безотказного процесса диагностирования проведены расчеты с помощью программного обеспечения – Solid Works Simulation и встроенный в него метод конечных элементов (МКЭ). Для расчета напряжений решающая программа находит перемещения в каждом узле, а затем вычисляет деформации и конечное напряжение. В результате исследования предложенный метод диагностирования позволяет достичь точности до 96 %.

*Ключевые слова:* вибродиагностика, газораспределительный механизм, клапана, зазор, частота вращения.

### Введение

В современном машиностроении наметилась серьезная тенденция на совершенствование систем и узлов под высокотехнологичные стандарты ЕВРО-5 и 6 [1, 2]. Различными научными, исследовательскими и конструкторскими организациями одновременно улучшаются характеристики топлив, масел, рабочих жидкостей [3–5]. Но вместе с тем очень важен непрерывный контроль правильности функционирования систем автомобилей [6–9]. Для чего разрабатываются бортовые информационные системы, алгоритмы, методы и средства диагностирования систем автомобиля [10, 11]. Особое внимание уделяется адаптивности элементов и систем под постоянно изменяющиеся условия эксплуатации и техническое состояние [12–14]. Примером может служить ГРМ современных автомобилей, в конструкции которого произошли существенные изменения за последние годы [15–17]. Эти изменения связаны с появлением: гидротолкателей клапанов, автоматических гидронатяжителей цепей ГРМ, автоматической регулировки фаз ГРМ. Однако при всех этих доработках нет главного – электронных систем контроля зазоров ГРМ и надежных методов их диагностирования. Вместе с тем для диагностирования ГРМ применяют ряд известных разборных и безразборных методов. Из них наиболее известны методы контроля:

компрессии, утечки воздуха из цилиндров ДВС, компрессорно-вакуумный метод, тепловых зазоров при помощи щупа, эндоскопический метод, контроля динамического давления в камере сгорания ДВС, по вибрации и шуму [18–20]. Однако низкая достоверность этих методов при существенной трудоемкости требует разработки новых и совершенствования существующих методов диагностирования ГРМ. Статистика отказов элементов ГРМ современных автомобилей представлена на рис. 1.



Рис. 1. Распределение отказов ГРМ

Как видно из рис. 1 доминирующее число отказов возникает по причине предельного роста зазоров в ГРМ и смещения фаз ГРМ. Разработка современных достоверных методик диагностирования ГРМ и их последующее применение позволит исключить значительное число отказов ГРМ.

Таким образом, целью исследования является повышение эффективности диагностирования газораспределительного механизма ДВС по параметрам вибрации, возникающей при работе механизма.

### Теоретические исследования

В начале анализа рассмотрим важный вопрос – возможность сравнения сигналов с датчика положения коленчатого вала (ДПКВ) и датчика положения распределительного вала (ДПРВ) относительно друг друга (рис. 2).

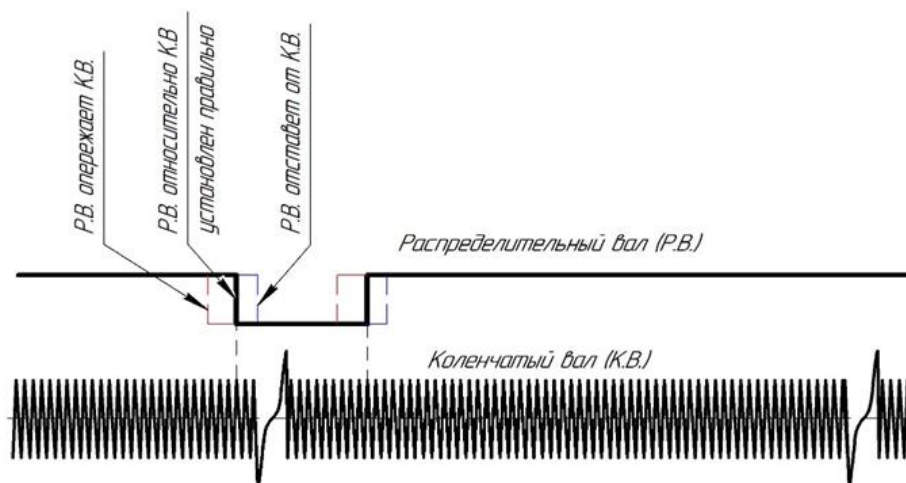


Рис. 2. Сравнение сигналов с ДПКВ и ДПРВ автомобиля ВАЗ-2114

## Контроль и испытания

Сравнение сигналов с ДПКВ и ДПРВ относительно друг друга позволяет определить взаимное расположение валов. При этом необходимо иметь точные сведения или эталонную осциллограмму смещение фронтов сигналов. Диагностирование фаз ГРМ данным способом имеет неудовлетворительную точностью, так как наличие тепловых зазоров, износ отдельных деталей привода ГРМ не учитываются.

В современных ДВС в состав электронной системы управления (ЭСУД) входят датчики положения коленчатого вала и, при фазированном впрыске – датчики положения распределительного вала. Наибольшее распространение получили следующие типы датчиков:

1) индуктивного типа, конструкция которых состоит из магнитного сердечника, помещенного в обмотку. Для работы датчика не требуется подача питания. Из-за простоты конструкции является самым распространенным;

2) на основе эффекта Холла. Датчик способен обеспечивать высокую точность измерения во всем диапазоне изменения оборотов вала;

3) оптического типа. Они не получили широкого применения из-за сложных условий работы ДВС (повышенная влажность, пыль и т. д.).

Для работы с датчиками используются кодирующие устройства, выполненные в виде различных задающих дисков, пластин, намагниченных дорожек, специальной формы хвостовой части валов и др.

Рассмотрим сравнение сигналов датчиков на автомобиле Toyota 2GR-FE (рис. 3).

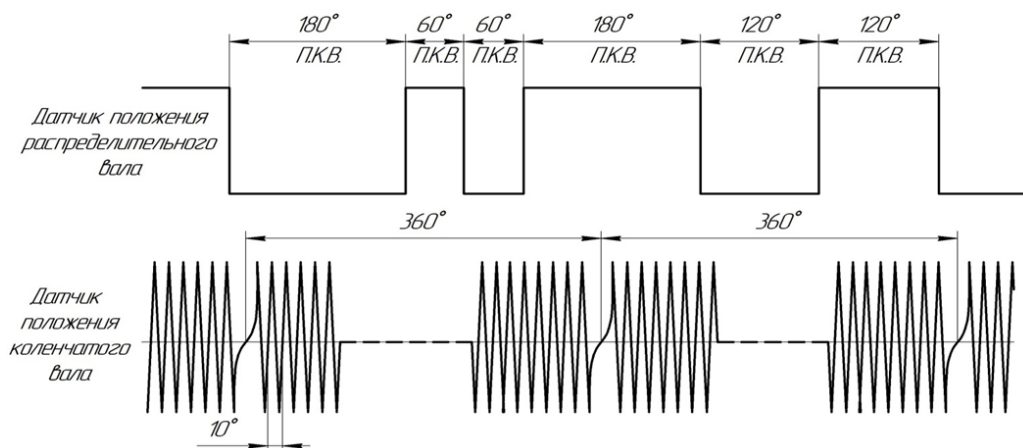


Рис. 3. Сигналы ДПКВ и ДПРВ на автомобиле Toyota 2GR-FE

На рис. 3 (по сравнению с рис. 2) видны кардинальные отличия, которые выражаются в отличии фазовых процессов. В этом и состоит некоторая сложность применения новых методов контроля фаз на различных автомобилях. Практически каждая модель – это новый вариант соотношения фаз между ГРМ и положением коленчатого вала ДВС. А это в свою очередь свой адаптированный алгоритм применения метода диагностирования.

Приведем пример еще одного варианта сигналов ДПКВ и ДПРВ на автомобиле Nissan QG15 (рис. 4).

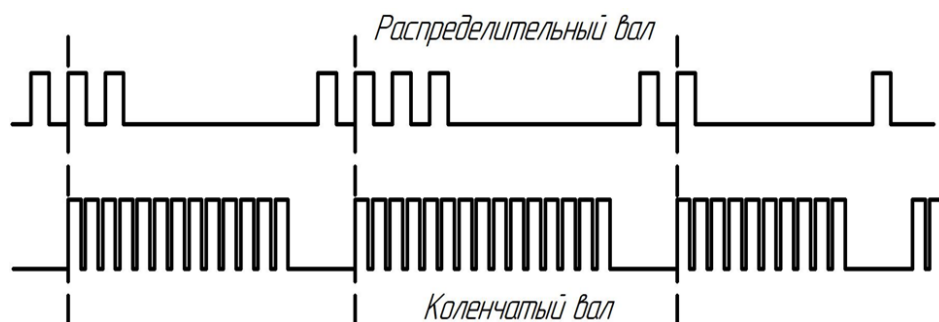


Рис. 4. Сигналы ДПКВ и ДПРВ автомобиля Nissan QG15

Анализ рис. 4 показывает на существенные фазовые отличия автомобиля Nissan QG15 от приведенных выше рисунков. Помимо этого, информацию о смещении фаз затруднительно найти в свободных источниках.

Рассмотрим теоретические особенности применения нового способа диагностирования ГРМ (рис. 5).

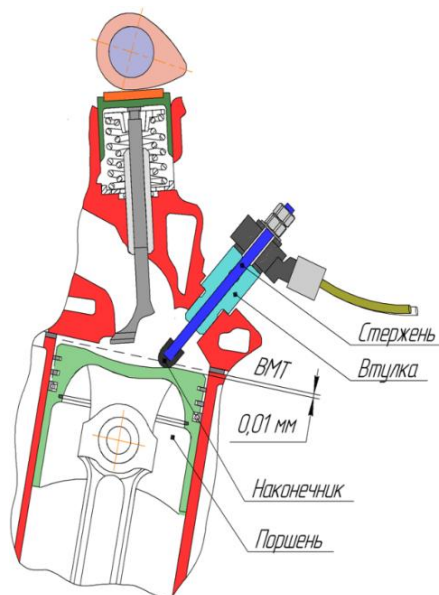


Рис. 5. Схема установки элементов при использовании нового способа диагностирования ГРМ

На рис. 5 представлена схема, где вместо свечи вкручена втулка со стержнем, на конце которого расположен наконечник. Наконечник упирается в поршень, который установлен в положении ВМТ. На конце втулки гайкой прикручен вибродатчик. При помощи вибродатчика реализуется новый способ определения основных неисправностей ГРМ (герметичность сопряжения «клапан–седло», тепловой зазор в приводе клапана, фазы открытия и закрытия клапанов) заключающийся в измерении и анализе виброакустических импульсов, вызванных работой отдельных элементов двигателя. В качестве параметров сигналов используется максимум амплитуды (пик) и момент возникновения виброимпульсов. За опорный сигнал ВМТ поршня исследуемого цилиндра принимается виброимпульс от соударения поршня об упругий наконечник, помещенный в камеру сгорания. Для установки необходимого зазора перед стержнем устанавливается индикатор часового типа (рис. 6).

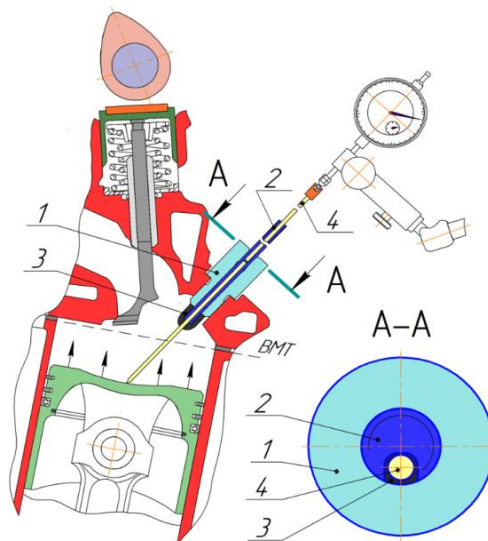


Рис. 6. Установка зазора индикатором часового типа

## Контроль и испытания

С помощью индикатора часового типа ИЧ-10 (рис. 6) были определены фазы ГРМ, построена круговая диаграмма при тепловом зазоре выпускных клапанов  $0,35 \pm 0,01$  мм, выпускных  $0,2 \pm 0,01$  мм.

Подготовка к диагностированию производится в 2 этапа.

1. В исследуемый цилиндр двигателя через свечное отверстие заливается небольшое количество моторного масла (10 мл), после чего коленчатый вал прокручивается стартером 3–5 с. Это позволяет в случае износа ЦПГ уплотнить сопряжение «поршень–гильза» и минимизировать силу удара при перекладке поршня.

2. С помощью щупа (позиция 4) проверяется ход поршня исследуемого цилиндра на соответствие нормативному значению, это позволяет исключить возможные искажения ВМТ поршня, вызванные различными причинами: последствия гидроударов, несоответствие установленного КШМ модели двигателя, измененный объем камеры сгорания в следствии доработки опорной поверхности головки блока цилиндров и др. Для этого в свечное отверстие исследуемого (проверяемого) двигателя вкручивается до упора (момент  $\approx 10\text{--}15$  Н·м) втулка (позиция 1) совместно со шпилькой (позиция 2) и наконечником (позиция 3). При этом наконечник (позиция 3) своей плоской гранью прижат к торцу (поверхности Б) втулки (позиция 1). В проточку на шпильке (позиция 2) вставляется щуп (позиция 4), который свободно (без заклинивания) перемещается внутри шпильки и наконечника. Щуп (позиция 4) имеет метки, предварительно нанесенные для данной модели двигателя НМТ и ВМТ. Прокручивая коленчатый вал любым удобным способом, поочередно подводим поршень в НМТ и ВМТ, в крайних положениях поршня проверяем совпадение соответствующей метки на щупе (НМТ, ВМТ) (позиция 4) с торцевой поверхностью втулки (позиция 1) (поверхность А). Применение индикатора часового типа, закрепленного на неподвижном штативе, позволяет повысить точность установки крайних положений поршня. После проведения проверки соответствия хода поршня нормативному значению, поршень исследуемого цилиндра, устанавливается ниже ВМТ на  $0,01$  мм по щупу (позиция 4), что соответствует  $1\text{--}2$  градуса по углу поворота коленчатого вала, далее щуп извлекается из отверстия втулки. Следует отметить, что установка поршня в положении  $0,01$  мм ниже ВМТ возможна любым другим альтернативным способом, обеспечивающим заданную точность.

### Методика экспериментального исследования

При дальнейшей проработке нового метода возникла потребность проведения расчетов для обеспечения безотказного процесса диагностирования. Для чего использовано программное обеспечение – Solid Works Simulation и встроенный в него метод конечных элементов (МКЭ). Метод МКЭ заключается в решении системы уравнений, учитывающих поведение каждого элемента соединения с другими элементами. Эти уравнения связывают используемую модель с известными свойствами материала, ограничениями и нагрузками. Далее программа упорядочивает уравнения в большую систему совместных алгебраических уравнений и находит неизвестные. Для расчета напряжений решающая программа находит перемещения в каждом узле, а затем вычисляет деформации и конечное напряжение.

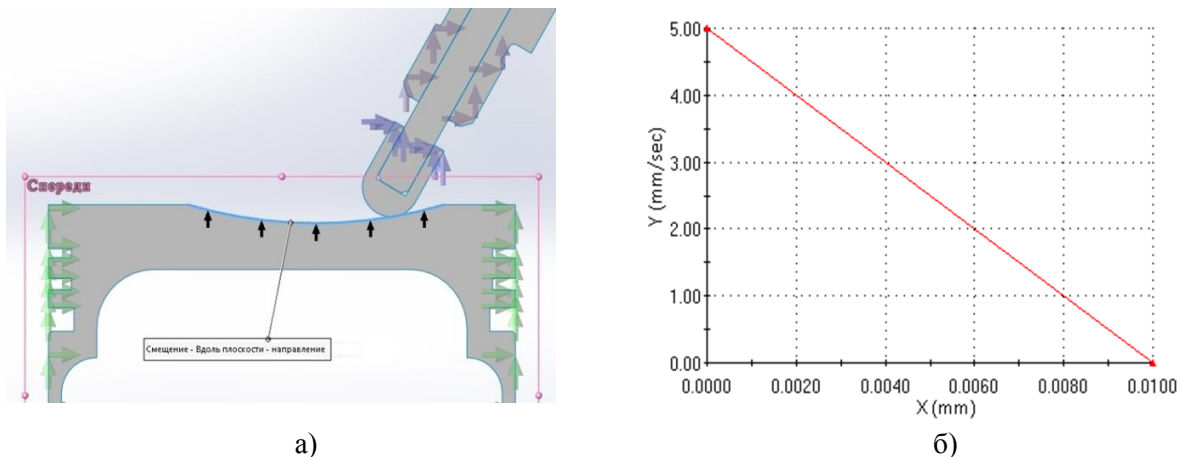
Исследования проводились на основе нелинейного динамического анализа, так как материал BFlex, из которого изготовлен наконечник, имеет нелинейную зависимость между напряжением и деформацией. При этом нагрузки в некоторых случаях изменяются во время деформирования модели.

Поршень, не доходя до ВМТ  $0,01$  мм (что соответствует менее  $2$  град. поворота коленчатого вала), ударяется об упругий наконечник, жестко закрепленный на стальном стержне, и движется с установленной скоростью согласно выполненному кинематическому расчету, при этом общая приведенная масса равна  $0,665$  кг.

Было принято использовать 2-D упрощение типа плоскостное напряжение, так как силы, действующие по нормали к выбранной плоскости сечения пренебрежимо малы (рис. 8а).

Каждому элементу был применен (назначен) материал, из которого он изготовлен, с соответствующими физическими свойствами. На рисунке 8б показана зависимость скорости движения поршня от величины зазора. Величина зазора была выбрана  $0,01$  мм с учетом свойств материала BFlex, применяемого при изготовлении наконечника. Из-за очень малого изменения скорости

при перемещении поршня зададим зависимость перемещения от скорости линейно по двум точкам, соответствующим моменту удара и ВМТ поршня.



а) ограничения (зафиксированная геометрия);  
б) зависимость скорости движения поршня от величины зазора

Выбраны две контактирующие кромки, с условием – «без проникновения» и коэффициентом трения 0,5. На рис. 9 показана схема условий контакта элементов при реализации нового метода диагностирования.

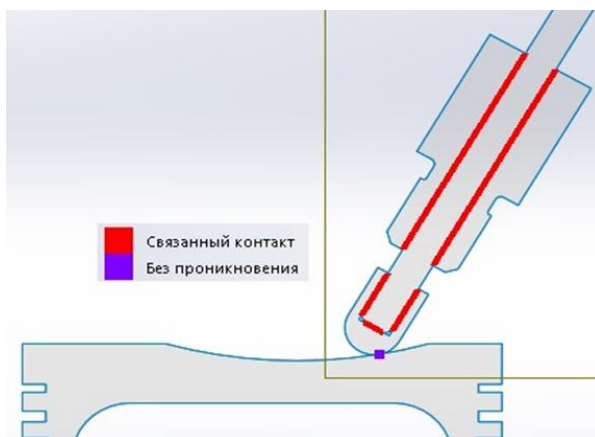


Рис. 9. Условия контакта

На следующем этапе подготовки расчетов нанесем сетку (параболические тетраэдральные твердотельные элементы) (рис. 10).

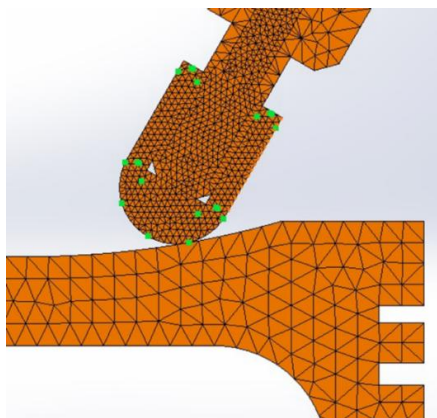


Рис. 10. Сетка (параболические тетраэдральные твердотельные элементы)

## Контроль и испытания

Для проведения расчетов была создана сетка высокого качества в виде параболических тетраэдральных твердотельных элементов, так как они более точно представляют изогнутые границы и производят лучшие математические аппроксимации чем линейные тетраэдральные твердотельные рис. 10. На основе объема и площади поверхности модели был выбран глобальный размер элемента сетки 0,9 мм, при этом в зоне контакта и переходов, сетка имеет более плотную структуру для повышения сходимости результатов.

Результаты расчета представлены на рис. 11.

На рис. 11 показаны напряжения, реализуемые в контакте наконечника с поверхностью поршня при различных скоростях движения поршня. На рис. 11 д и е видно, что образовались предельные напряжения, которые указывают на ограничение прикладываемой нагрузки. По результатам прочностного расчет построена зависимость величин напряжений от частоты вращения коленчатого вала при различной величине заглублинии наконечника в сторону поршня рис. 12.

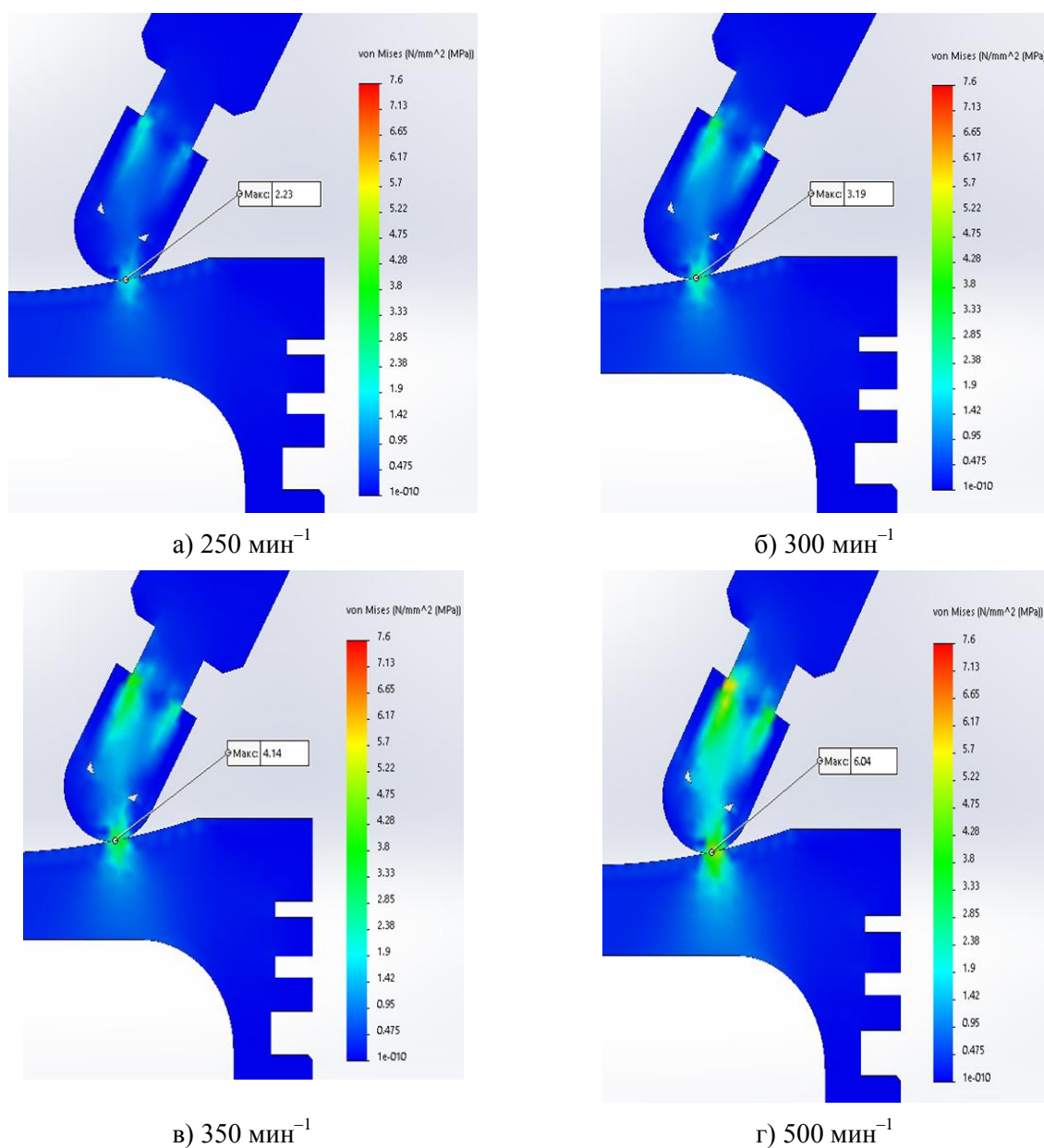


Рис. 11. Результаты расчета в приложении Solid Works Simulation

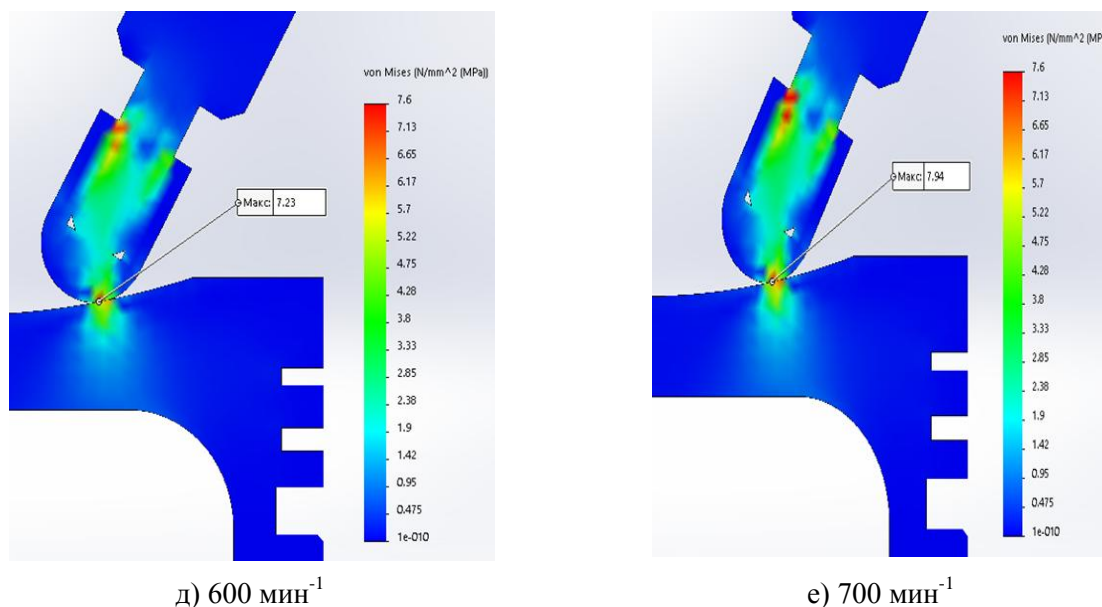


Рис. 11. Окончание

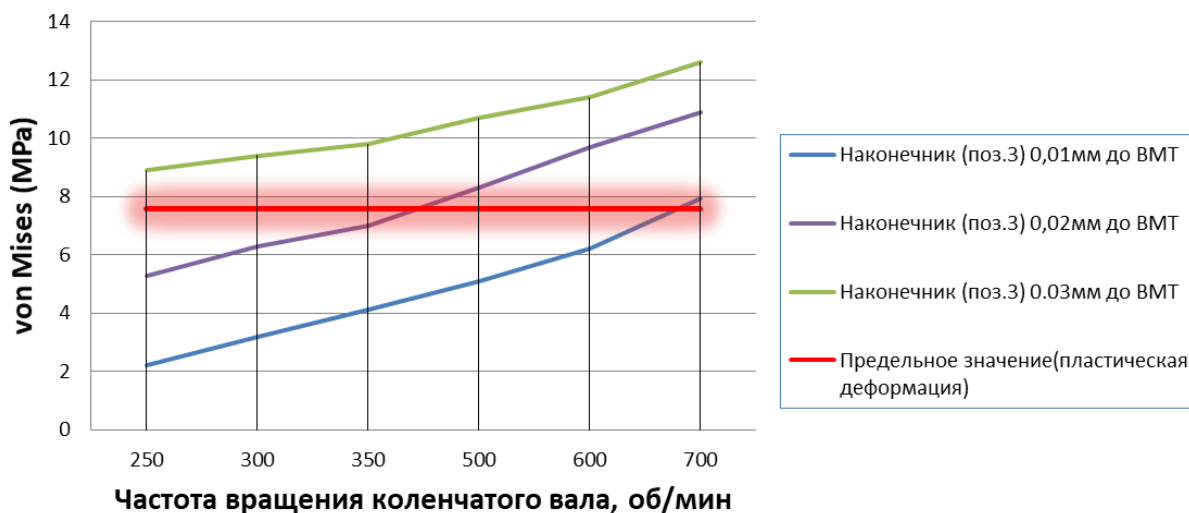


Рис. 12. Зависимость величин напряжений от частоты вращения коленчатого вала при различной величине заглубления наконечника в сторону поршня

Красной линией (рис. 12) обозначено предельное значение напряжения, при котором деформации из упругих перетекают в пластические. Из графика (рис. 12) можно сделать вывод, при заглублении наконечника, согласно методике диагностирования, на 0,01 мм ниже ВМТ, при частоте вращения до 600 мин<sup>-1</sup> (что больше частоты вращения коленчатого вала при прокрутке стартером), наконечник не испытывает пластические деформации и может быть многократно использован.

#### Выводы

Разработан новый способ диагностирования ГРМ основанный на контроле виброколебаний элементов ГРМ. Спроектированы и рассчитаны основные элементы приспособления для контроля ГРМ. Установочный зазор между наконечником и поршнем не должен превышать 0,01 мм. Использование диагностического мотор-тестера Diamag 2 совместно с вибродатчиком в качестве средства контроля позволяет повысить достоверность диагностирования ГРМ до 96 %. Использование разработанной методики позволяет исключить внешние влияния и неточности, связанные с изменением геометрии элементов ДВС.



### Литература

1. *Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles* / T. Grigoratos, G. Fontaras, B. Giechaskiel et al. // *Atmospheric Environment*. – 2019. – Vol. 201. – P. 348–359.
2. *NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions* / P. Mendoza-Villafuerte, R. Suarez-Bertoa, B. Giechaskiel et al. // *Science of the Total Environment*. – 2017. – Vol. 609. – P. 546–555.
3. *Gad, M.S. Improving the diesel engine performance, emissions and combustion characteristics using biodiesel with carbon nanomaterials* / M.S. Gad, B.M. Kamel, I. Anjum Badruddin // *Fuel*. – 2021. – Vol. 288. – № 119665.
4. *Nagendramma, P. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview* / P. Nagendramma, S. Kaul // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16. – № 1. – P. 764–774. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.002
5. *Enhanced tribological properties of diesel engine oil with Nano-Lanthanum hydroxide/reduced graphene oxide composites* / B. Wu, H. Song, C. Li et al. // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 141. – № 105951. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105951
6. *Gritsenko, A. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading* / A. Gritsenko, E. Zadorozhnaya, V. Shepelev // *Tribology in Industry*. – 2018. – Vol. 2. – № 40. – P. 300–310. DOI: 10.24874/ti.2018.40.02.13.
7. *Liu, X. Optimized design of fuel pump fault diagnosis experimental device and test program* / X. Liu, B. Jing, H. Shi et al. // *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*. – 2017. – Vol. 37. – № 6. – P. 1187–1194. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2017.06.018.
8. *Макушин, А.А. Аналитические исследования влияния конструкции ГПМ на показатели ДВС* / А.А. Макушин // *Автомобильная промышленность*. – 2012. – № 3. – С. 12–16.
9. *Chamarthi, G.K. Comprehensive Diagnostic Methodology* / G.K. Chamarthi, A. Sarkar, P. Baltusis et al. // *SAE Technical Papers*. – 2017. – March.
10. *Лютин, К.И. Вибродиагностика систем ДВС с использованием нейронных сетей* / К.И. Лютин, В.Е. Федянов // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. – 2007. – Т. 2, № 8 (34). – С. 88–90.
11. *Chen, J. Improved automated diagnosis of misfire in internal combustion engines based on simulation models* / J. Chen, R. Bond Randall // *Mechanical Systems and Signal Processin*. – 2015. – Vol. 64. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.02.027
12. *Moskwa, J.J. A new methodology for use in engine diagnostics and control, utilizing “synthetic” engine variables: Theoretical and experimental results* / J.J. Moskwa, W. Wang, D.J. Bucheger // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*. – 2001. – Vol. 123. – № 3. – P. 528–534. DOI: 10.1115/1.1387019
13. *A review on application of artificial neural network (ANN) for performance and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel-based fuels* / A. Tuan Hoang, S. Nizetić, H. Chyuan Ong, W. Tarelko, V. Viet Pham, T. Hieu Le, M. Quang Chau, X. Phuong Nguyen // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2021. – Vol. 47. – № 101416. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101416.
14. *A review of optical diagnostic platforms and techniques applied in internal combustion engines* / X. He, Y. Wu, X. Ma et al. // *Shiyan Liuti Lixue/Journal of Experiments in Fluid Mechanics*. – 2020. – Vol. 34. – № 3. – P. 1–52. DOI: 10.11729/sytlx20200003
15. *Злотин, Г.Н. Анализ вибрационных свойств двигателя применительно к системам вибродиагностики механизма газораспределения* / Г.Н. Злотин, К.И. Лютин // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2008. – Т. 1. – № 6 (44). – С. 8–11.
16. *Гриценко, А.В. Метод диагностирования газораспределительного механизма по параметрам расхода воздуха и фаз газораспределения ДВС* / А.В. Гриценко // *АПК России*. – 2012. – Т. 62. – С. 32–34.
17. *Повышение эффективности диагностирования тепловых зазоров клапанов ГПМ с помощью вибродатчика (акселерометра)* / А.С. Балясников, А.В. Гриценко, К.В. Глемба и др. // *АПК России*. – 2018. – Т. 25. – № 3. – С. 377–387.
18. *Sohaib, M. Reliable Fault diagnosis of rotary machine bearings using a stacked sparse autoencoder-based deep neural network* / M. Sohaib, J.M. Kim // *Shock and Vibration*. – 2018. – № 2919637.

19. Shiyuan, L. Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head / L. Shiyuan, G. Fengshou, A. Bal // *Journal of Automobile Engineering*. – 2006. – Vol. 220. – № 3. – P. 379–386.

20. Galiullin, L.A. Development of technical diagnostic system for internal combustion engines / L.A. Galiullin, R.A. Valiev, I.A. Galiullin // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. – 2019. – Vol. 16. – № 11. – P. 4569–4572.

**Гриценко Александр Владимирович**, доктор технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, alexgrits13@mail.ru

**Шепелев Владимир Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shepelevvd@susu.ru

**Бурцев Александр Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Горное дело и технологическая безопасность», Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (г. Белово), burceval2009@yandex.ru

*Поступила в редакцию 2 декабря 2021 г.*

DOI: 10.14529/engin220103

## DIAGNOSTICS OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM BASED ON THE CONTROL OF VIBRATION VIBRATIONS OF ITS ELEMENTS

**A. V. Gritsenko**<sup>1</sup>, alexgrits13@mail.ru

**V. D. Shepelev**<sup>1</sup>, shepelevvd@susu.ru

**A. Yu. Burtsev**<sup>2</sup>, burceval2009@yandex.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Belovo, Russian Federation

The operability and efficiency of the engines significantly depend on the periodic diagnostics of their technical condition. Currently, vibration-based damage detection (measurement of vibration characteristics of structures and mechanisms) is a promising area of research activity. The features of monitoring and diagnostics of internal combustion engines using vibroacoustic analysis are considered. In the article a method has been developed for determining the main malfunctions of the gas distribution mechanism (tightness of the valve-seat coupling, thermal gap in the valve actuator, valve opening and closing phases), consisting in measuring and analyzing vibroacoustic pulses caused by the operation of individual engine elements. The maximum amplitude (peak) and the moment of occurrence of vibration pulses are used as signal parameters. A vibration pulse from the impact of the piston on the elastic tip placed in the combustion chamber is taken as the reference signal of the TDC of the piston of the cylinder under study. The speed of rotation of the crankshaft up to 600 min<sup>-1</sup> (does not exceed the frequency of scrolling by the starter) does not lead to the appearance of dangerous stresses in any of the elements of the engine and the device. At the same time, the tip made of Bflex plastic, as the most malleable element, can be repeatedly used. To ensure a trouble-free diagnostic process, calculations were carried out using the software – Solid Works Simulation and the finite element method (FEM) built into it. To calculate the stresses, the solver finds the displacements at each node, and then calculates the deformations and the final stress. As a result of the study, the proposed diagnostic method allows to achieve an accuracy of up to 96 %.

*Keywords: vibrodiagnostics, gas distribution mechanism, valves, clearance, rotation speed.*

### References

1. Grigoratos T., Fontaras G., Giechaskiel B., Zacharof N. Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 2019, vol. 201, pp. 348–359.
2. Mendoza-Villafuerte P., Suarez-Bertoa R., Giechaskiel B., Riccobono F., Bulgheroni C., Astorga C., Perujo A. NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 546–555.
3. Gad M.S., Kamel B.M., Anjum Badruddin I. Improving the diesel engine performance, emissions and combustion characteristics using biodiesel with carbon nanomaterials. *Fuel*, 2021, vol. 288, no. 119665.
4. Nagendramma P., Kaul S. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 1, pp. 764–774. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.002
5. Wu B., Song H., Li C., Song R., Zhang T., Hu X. Enhanced tribological properties of diesel engine oil with Nano-Lanthanum hydroxide/reduced graphene oxide composites. *Tribology International*, 2020, vol. 141, no. 105951. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105951
6. Gritsenko A., Zadorozhnaya E., Shepelev V. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading. *Tribology in Industry*, 2018, vol. 2, no. 40, pp. 300–310. DOI: 10.24874/ti.2018.40.02.13.
7. Liu X., Jing B., Shi H., Qiang X., Sheng Z. Optimized design of fuel pump fault diagnosis experimental device and test program. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2017, vol. 37, no. 6, pp. 1187–1194. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2017.06.018.
8. Makushin A.A. [Analytical Studies of the Influence of the Timing Design on the Performance of the Internal combustion engine]. *Automotive industry*, 2012, no. 3, pp. 12–16. (in Russ)
9. Chamarthi G.K., Sarkar A., Baltusis P., Laleman M. Comprehensive Diagnostic Methodology. *SAE Technical Papers*. 2017, March.
10. Lyutin K.I., Fedyanov V.E. [Vibration Diagnostics of ICE Systems Using Neural Networks]. *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*, 2007, vol. 2, no. 8, iss.34, pp. 88–90. (in Russ)
11. Chen J., Bond Randall R. Improved automated diagnosis of misfire in internal combustion engines based on simulation models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 64. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.02.027
12. Moskwa J.J., Wang W., Bucheger D.J. A new methodology for use in engine diagnostics and control, utilizing “synthetic” engine variables: Theoretical and experimental results. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2001, vol. 123, no. 3, pp. 528–534. DOI: 10.1115/1.1387019
13. Tuan Hoang A., Nižetić S., Chyuan Ong H., Tarelko W., Viet Pham V., Hieu Le T., Quang Chau M. Phuong Nguyen, X. A review on application of artificial neural network for performance and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel-based fuels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 47, no. 101416. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101416.
14. He X., Wu Y., Ma X., Li Y., Qi Y., Liu Z., Xu Y., Zhou Y., Li X., Liu C., Feng H., Liu F. A review of optical diagnostic platforms and techniques applied in internal combustion engines. *Shiyan Liuti Lixue/Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020, vol. 34, no. 3, pp. 1–52. DOI: 10.11729/sytlx20200003
15. Zlotin G.N., Lyutin K.I. [Analysis of the Vibration Properties of the Engine as Applied to the Vibration Diagnostics Systems of the Gas Distribution Mechanism]. *Bulletin of the Volgograd State Technical University*, 2008, vol. 1, no. 6, iss. 44, pp. 8–11. (in Russ)
16. Gritsenko A.V. [A Method for Diagnosing the Gas Distribution Mechanism by the Parameters of the Air Flow Rate and the Valve Timing of the Internal Combustion Engine]. *Agroindustrial complex of Russia*, 2012, vol. 62, pp. 32–34. (in Russ)
17. Balyasnikov A.S., Gritsenko A.V., Glemba K.V., Lukomsky K.I. [Improving the Efficiency of Diagnosing Thermal Clearances of Timing Valves Using a Vibration Sensor (Accelerometer)] *Agroindustrial complex of Russia*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 377–387. (in Russ)
18. Sohaib M., Kim J.M. Reliable Fault diagnosis of rotary machine bearings using a stacked sparse autoencoder-based deep neural network. *Shock and Vibration*, 2018, no. 2919637.

19. Shiyuan L., Fengshou G., Bal A. Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head. *Journal of Automobile Engineering*, 2006, vol. 220, no. 3, pp. 379–386.

20. Galiullin, L.A., Valiev R.A., Galiullin I.A. Development of technical diagnostic system for internal combustion engines. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2019, vol. 16, no. 11, pp. 4569–4572.

*Received 2 December 2021*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Гриценко, А.В. Диагностирование газораспределительного механизма на основе контроля виброколебаний его элементов / А.В. Гриценко, В.Д. Шепелев, А.Ю. Бурцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 36–47. DOI: 10.14529/engin220103

**FOR CITATION**

Gritsenko A.V., Shepelev V.D., Burtsev A.Yu. Diagnostics of the gas distribution mechanism based on the control of vibration vibrations of its elements. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 36–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220103

---