2. Виноградов А.В., Большев В.Е., Виноградова А.В. Системы интеллектуализации распределительных электрических сетей // Информационные технологии, системы и приборы в АПК: материалы 7-й Международной научно-практической конференции "Агроинфо-2018". – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2018. – С. 443-447.
3. Octavian Mihai Ghita, Sorin Dan Grigorescu, Costin Cepisca, Adela Vintea. Power Quality Monitoring Systems for Smart Grid Networks. Conference: Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2013At: Bucharest Romania. May 2013. DOI:10.1109/ATEE.2013.6563537.
4. Aleksandar Stanimirović, Miloš Bogdanović, Milena Frtunić, Milena Frtunić. Low-voltage electricity network monitoring system: Design and production experience. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2020, Vol. 16(1). DOI: 10.1177/1550147720903629.
5. Joaquim Meléndez, Laiz Souto, Sergio Herraiz. Monitoring of low voltage grids with multilayer principal component analysis. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 125:106471, February 2021. DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106471
6. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов Д.Ю. Применение интеллектуальных систем учета электроэнергии для своевременной корректировки нормативных значений для расчета электрических нагрузок // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы 3-й междунар. молод. конф. REEPE 2021, – М.: МЭИ, 2021, Стр. 9388018. DOI 10.1109/REEPE51337.2021.9388018.
7. S. D. Thakar, A. S. Vijay and S. Doolla, "System Reconfiguration in Microgrids", Elsevier: Sustainable Energy, Grids and Networks., vol. 17, March 2019. DOI 17. 100191. 10.1016/j.segan.2019.100191
8. A. Vinogradov, A. Seyfullin, A. Vinogradova, V. Bolshev, A. Bukreev and Z. Shakurova, Analysis of the concepts of building microgrids containing distributed generation objects, E3S Web of Conferences: International Symposium Sustainable Energy and Power Engineering 2021 (SUSE-2021), Kazan, Russia, February 18-20, 2021. DOI 2021 288. 01108. 10.1051/e3sconf/202128801108.
9. H.J. Moon, J.W. Chang, S.I. Moon, Y.J. Kim, Decentralised active power control strategy for real-time power balance in an isolated microgrid with an energy storage system and diesel generators, Energies, 2019, vol. 12, no 3., p. 511. DOI 10.3390/en12030511.
10. A. Iqbal, T. Iqbal Low-cost and secure communication system for SCADA system of remote microgrids, Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019, vol. 2019, p. 1986325. DOI 10.1155/2019/1986325.
11. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Псарёв А.И., Лансберг А.А., Большев В.Е. Повышение эффективности защиты линий электропередачи 0,4 кВ с отпайками от однофазных коротких замыканий за счет применения мультиточечной коммутационной системы МКС-2-3В // Вестник Казанского ГАУ. – 2020. – № 3 (59). – С. 58-63.
12. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Псарёв А.И., Самарин Г.Н., Большев В.Е. Повышение надежности электроснабжения потребителей посредством применения мультиточечных коммутационных систем в линиях электропередачи 0,4 кВ с отпайками // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 11 (114). – С. 48-64. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10105.
13. Виноградов А.В. Понятие и принципы управления конфигурацией интеллектуальных электрических сетей // Агротехника и энергообеспечение. – 2020. – №4 (29). – С. 5-14.
14. АРМ Диспетчера (software2b.ru) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.software2b.ru/> (дата обращения: 12.09.2021)
15. Пронин А.И., Щелкунов Е.Б. Теория автоматического управления : учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 108 с.
16. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ (narod.ru). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ani-studio.narod.ru/> (дата обращения: 12.09.2021).

УДК.629.113:658.58

DOI: 10.26898/agroinfo-2021-242-248

*Гребенников С.А., Гребенников А.С., Басков В.Н., Киселёв Г.О., Рогожин А.В.,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.»*

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОМПРЕССИИ ЦИЛИНДРОВ ДВС

В работе анализируются методы контроля технического состояния цилиндропоршневой группы ДВС и рассмотрены методологические вопросы повышения точности диагностирования компрессионных свойств цилиндров по показателям внутрицикловых изменений угловой скорости коленчатого вала при работе двигателя в режиме холостого хода на одном цилиндре. Приведены результаты теоретического обоснования и экспериментальной проверки предложенного способа оценки компрессии в цилиндрах.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, диагностирование, компрессия цилиндров, неравномерность, угловая скорость.

Одним из самых главных агрегатов в автомобилях, дорожно-строительной и сельскохозяйственной технике является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), в целом определяющий их экономические и экологические эксплуатационные показатели. Известно, что до 30 % материальных и трудовых затрат для обеспечения работоспособности ДВС расходуется на устранение отказов кривошипно-шатунного механизма (КШМ), 70 % дефектов которых относят к неисправностям цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [1]. Этими причинами обусловлена экономическая целесообразность предупреждения отказов и неисправностей ЦПГ путем диагностирования ее состояния.

Общепринятым способом диагностирования технического состояния ЦПГ двигателя является анализ показателей компрессии в цилиндрах, оцениваемой по максимальному значению давления рабочей смеси в каждом цилиндре в конце такта сжатия – P_c и ее неравномерности по отдельным цилиндрам, которая не должна превышать 0,05 МПа для бензиновых и 1 МПа – для дизельных ДВС.

Измерение компрессии цилиндра осуществляется на прогретом до рабочей температуры 90–95 °С двигателе несколькими способами с использованием расходомера картерных газов, пневмотестера, вакуумметра, компрессометра, с применением динамического метода диагностирования с использованием тестовых динамических воздействий [1, 3-6]. Диагностика ЦПГ компрессометром особо популярна на станциях технического обслуживания (СТО) из-за простоты применения. Она выполняется с помощью компрессометра при прокручивании стартером коленчатого вала ДВС после удаления всех свечей зажигания (форсунок) при полностью открытых воздушной и дроссельной заслонках [1].

Более оперативно информацию о компрессионных свойствах цилиндров двигателя получают по значениям пульсаций тока стартера при прокручивании коленчатого вала в отсутствии подачи топлива или искры от свеч зажигания [1, 3, 4]. Однако, при этом способе диагностирования определяется только показатель относительной компрессии по цилиндрам без указания максимального ее значения в цилиндре, взятого за эталон (с максимальным значением тока). Высокая погрешность также обусловлена влиянием на силу тока технического состояния стартера, аккумуляторной батареи и электропроводов.

Рисунок 1. Изменение компрессии P_c в цилиндрах, составляющих момента сопротивления M_c и угловой скорости ω по углу поворота φ коленчатого вала при прокручивании стартером четырехцилиндрового ДВС

Большой потенциал к совершенствованию имеет способ, разработанный в СГТУ имени Гагарина Ю.А., согласно которому о компрессионных свойствах цилиндров ДВС судят по показателям внутрицикловых изменений угловой скорости коленчатого вала (ВИУСКВ) при прокручивании коленчатого вала ДВС стартером в отсутствие процесса сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндрах. Суть способа заключается в следующем.

Принудительное вращение коленчатого вала ДВС стартером со средней угловой скоростью ω при отсутствии сгорания рабочей смеси в цилиндрах с крутящим моментом M вызывает изменение угловой скорости ω вала по углу его поворота ϕ (рисунок 1) из-за отклонений мгновенного значения момента сопротивления от действия компрессионных сил $M_{ср}$ относительно среднего его значения M_c [2, 5]:

$$M = M_c + J_n \omega \frac{d\omega}{d\phi}, \quad (1)$$

где J_n – суммарный момент инерции вращающихся и поступательно движущихся масс элементов системы «ДВС-стартер», приведенный к оси коленчатого вала.

Из уравнения (1) следует, что, если начальное значение угловой скорости «прикрепить» к положению коленчатого вала по углу его поворота ϕ , соответствующему нахождению поршня первого цилиндра в ВМТ на такте сжатия, то по характерным точкам ее изменения в кратных числу z цилиндров угловых интервалах $(4\pi/z)$ можно оценивать и сравнивать компрессионные свойства цилиндров. Свидетельство этому – баланс моментов, формирующих момент сопротивления $M_{ср}$ на коленчатом валу двигателя, и расчеты их удельного влияния на показатели ВИУСКВ.

$$M_{сф} = M_m + M_n \pm M_{п} \pm M_{пр} + M_{цпг} \pm M_k, \quad (2)$$

где M_m – момент механических потерь от действия сил трения в подшипниках коленчатого и распределительного валов и вспомогательных механизмах (водяной, масляный и топливный насосы, генератор, вентилятор и другие);

M_n – момент, затрачиваемый на процесс газообмена в цилиндрах (насосные потери);

$M_{п}$ – момент переменной составляющей сил инерции от возвратно-поступательно движущихся масс двигателя;

$M_{пр}$ – переменный момент, затрачиваемый на преодоление сил упругости клапанных пружин;

$M_{цпг}$ – момент от сил трения в сопряжениях ЦПГ;

M_k – переменный момент сопротивления от действия компрессионных сил сжатия-расширения рабочего тела P_k .

Количественный анализ моментов сопротивления (2) показал, что основной переменной составляющей механических потерь ДВС являются потери на трение поршневых колец и поршней $M_{цпг}$, функционально зависящие от угла поворота коленчатого вала ϕ .

$$M_{цпг} = \sum_{i=1}^z P_{цпгi} R \frac{\sin \phi_i + \beta_i}{\cos \beta_i} \approx \sum_{i=1}^z P_{цпгi} \cdot R \left(\sin \phi_i + \frac{\lambda}{2} \sin 2\phi_i \right), \quad (3)$$

где $P_{цпгi}$ – сила трения в сопряжениях ЦПГ i -го цилиндра;

ϕ_i – значение угла поворота коленчатого вала при работе i -го цилиндра в порядке их чередования с учетом фазового угла сдвига между одноименными рабочими тактами;

$\lambda = R/L$ – отношение радиуса кривошипа R к длине шатуна L ;

β – угол отклонения шатуна от оси цилиндра, соответствующий ϕ_i .

Сила трения $P_{цпг}$ определяется силами взаимодействия поршневых колец $P_{пк}$ и юбки поршня $P_{юп}$ со стенками цилиндра и зависит от условий смазки, упругости колец и давления газовых сил. На установившемся режиме прокручивания коленчатого вала эти условия при скорости движения поршня в узком диапазоне 0-5 м/с и незначительной разности газовых сил в цилиндрах ДВС примерно одинаковы $P_{цпгi} = P_{цпг(i+1)} = P_{цпгz}$. Таким образом, момент $M_{цпг}$ является функцией только угла поворота ϕ коленчатого вала с периодом, кратным числу цилиндров $T_{M_{цпг}} = 4\pi/z$ (рисунок 1).

Поскольку момент сопротивления от действия компрессионных сил $P_{кр}$ для i -го цилиндра с площадью поршня F_n определяется

$$M_{\kappa_i} = P_{\kappa_i} F_n \cdot R \frac{\sin \phi_i + \beta_i}{\cos \beta_i} \approx P_{\kappa_i} F_n R \left(\sin \phi_i + \frac{\lambda}{2} \sin 2\phi_i \right), \quad (4)$$

то, в общем случае, суммарное действие компрессионных сил на среднее значение момента сопротивления M_c можно принять равным нулю (исходя из того, что затраченная кинетическая энергия на сжатие рабочего тела полностью возвращается при движении поршня от ВМТ на такте расширения). Однако влияние компрессионных сил на мгновенное значение момента сопротивления на протяжении такта сжатия в i -м цилиндре различно. Большая часть (75 %) работы сил давления сжатия рабочего тела при его расширении в предыдущем ($i-1$)-м цилиндре приходится на первую половину такта сжатия диагностируемого i -го цилиндра, а от сил сопротивления сжатия (компрессии) – на заключительную его половину (рисунок 1). Как следствие, действие компрессионных сил в первой части такта сжатия от 0 до ϕ_1 , характеризующих такт расширения в ($i-1$)-м цилиндре, проявится в уменьшении $M_{сф}$ по отношению к его среднему значению M_c :

$$M_{с\ 0-\phi_1} = M_m - M_{\kappa}, \quad (5)$$

а во второй части – от ϕ_1 до ϕ_2 , на такте сжатия в i -м цилиндре, – в увеличении

$$M_{с(\phi_1-\phi_2)} = M_m + M_{\kappa} \quad (6)$$

Исходя из вышеописанного, суммарный момент сопротивления M_c в режиме прокручивания стартером определяется моментами M_m , $M_{цпг}$ и M_{κ} , причем M_m – постоянная величина по углу поворота коленчатого вала, а M_m изменяется идентично в каждом угловом интервале, соответствующем периоду изменения M_c ($T_{Mc}=4\pi/z$). Единственной составляющей, способной вызвать индивидуальные внутрицикловые изменения M_c в угловых интервалах, кратных числу цилиндров ДВС, является момент компрессионных сил M_{κ} , что и следовало доказать.

При одинаковых значениях компрессии по цилиндрам значения экстремумов ω_{max} и ω_{min} колебаний угловой скорости в пределах угловых интервалов, соответствующих тактам сжатия рабочей смеси в каждом цилиндре, будут равны, а следовательно, одинаковые их значения амплитуд $A_{\omega} = \omega_{max} - \omega_{min}$ колебаний и избыточных работ $A_{изб} = J_n(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)/2$ на участках разгона каждого цилиндра.

Снижение компрессии в одном из цилиндров ДВС вызывает уменьшение M_c и соответственно участка убывания угловой скорости. В свою очередь, сжатые газы производят меньшую работу по разгону инерционных масс ДВС на такте расширения. Эти изменения $M_{сф}$ отразятся на значениях экстремумов угловой скорости в интервале углов поворота, соответствующих такту расширения в цилиндре с меньшей компрессией (рисунок 2).

Рисунок 2. Изменение скорости ω по углу ϕ коленчатого вала при прокручивании стартером четырехцилиндрового ДВС с уменьшенной компрессией в IV цилиндре: I-IV – номера цилиндров; $\omega_{IV\ max}$, $\omega_{IV\ min}$ – экстремумы угловой скорости для IV цилиндра

Так как чередование одноименных тактов по цилиндрам четырехцилиндрового ДВС происходит через 180^0 (π радиан) по углу поворота коленчатого вала, а начало измерений ω совпадает с ВМТ опорного I цилиндра в конце такта сжатия, то интервал $0-\pi$ поворота коленчатого вала на диаграмме (рисунок 2) соответствует такту рабочего хода I цилиндра, $\pi-2\pi$ – III цилиндра и, так далее, по порядку их работы.

Привязка угловых интервалов изменения ω именно к тактам рабочего хода соответствующих цилиндров обусловлена действием на этом такте компрессионной силы P_c , которая, как следует из анализа составляющих момента сопротивления (1), (2), определяет характер изменения M_c и, соответственно, внутрицикловой угловой скорости по углу поворота коленчатого вала $\omega = f(\varphi)$, по которой определяют показатели компрессионных свойств:

– относительную неравномерность по цилиндрам как отношение разности между максимальным и минимальным значениями одноименных экстремумов угловой скорости (ω'_{max} либо ω'_{min}) к ее среднему значению $\bar{\omega}$:

$$\delta_k = \frac{\omega'_{max} - \omega'_{min}}{\bar{\omega}}, \quad (7)$$

– по отдельным цилиндрам – по значениям амплитуд A_ω колебаний угловой скорости или избыточных работ $A_{изб}$ [2] на участках разгона в пределах соответствующих углов поворота.

Точность рассмотренного метода определения компрессионных свойств цилиндров выше других известных способов, т. к. диагностирование осуществляется за два оборота коленчатого вала – при более стабильных частотах вращения и тепловых состояниях деталей ЦПГ. Но и для этого способа диагностирования присущи недостатки, понижающие достоверность диагноза:

– нестабильная частота прокрутки коленчатого вала стартером – ее зависимость от зарядки аккумулятора и состояния стартера;

– имеется методическая погрешность измерения значений мгновенных угловых скоростей коленчатого вала из-за наличия гармоник высокочастотных ее колебаний в режиме прокрутки ДВС от динамического взаимодействия зубьев стартера с венцом маховика двигателя (рисунок 3).

Рисунок 3. Диаграмма мгновенных значений угловой скорости ω коленчатого вала по углу его поворота φ при прокручивании стартером четырехцилиндрового ДВС:

1 – исходная; 2 – аппроксимирующая кривая (по методу наименьших квадратов)

С целью исключить данные недостатки и повысить точность определения технического состояния ЦПГ предлагается осуществлять измерения ВИУСКВ при работе ДВС на одном цилиндре с отключенными остальными путем или при осуществлении режима торможения двигателем автомобиля на ровном участке дороги. Такой тестовый режим диагностирования технического ЦПГ возможен в современных ДВС, в которых автоматически прекращается поступление топлива в цилиндры при движении автомобиля в отсутствии нажатия на педаль управления его подачей.

Результаты экспериментальной проверки предложенного способа с помощью разработанного устройства (рисунок 4), работающего с датчиком угловых перемещений коленчатого вала высокой точности по первому варианту осуществления тестового режима диагностирования ЦПГ, подтвердили его эффективность.

Рисунок 4. Устройство для поэлементного диагностирования систем и механизмов ДВС

Благодаря запасенной кинетической энергии вращающихся и возвратно-поступательно движущихся элементов ДВС от работающего I цилиндра, значения мгновенных угловых скоростей коленчатого вала по углу его поворота в зависимости $\omega = f(\varphi)$ плавно изменяются (рисунок 5), в наибольшей степени соответствуют их действительным значениям, и позволяют по диагностическим параметрам $A_{изб.р}$, A_{pi}/A_{vi} в интервалах $\pi-2\pi$ и $2\pi-3\pi$, более точно оценить компрессионные свойства в III и IV цилиндрах. Для оценки компрессии I и II цилиндров необходимо выполнить диагностику при осуществлении рабочего процесса в IV цилиндре.

Рисунок 5. Изменение угловой скорости ω коленчатого вала по углу φ его поворота при работе ДВС 4Ч 9,2/9,2 на одном цилиндре с отключенными остальными

Разработанный бестормозной способ обеспечивает высокую точность поэлементного диагностирования ДВС и может быть использован для унифицированной бортовой диагностики автомобилей, имеющих электронные системы отключения цилиндров.

Выводы

1. Рассмотрены методологические вопросы повышения точности диагностирования компрессионных свойств цилиндров по показателям внутрицикловых изменений угловой скорости коленчатого вала (ВИУСКВ) при работе двигателя в режиме холостого хода на одном цилиндре.

2. Предложено определять следующие показатели компрессионных свойств:

– относительную неравномерность по цилиндрам как отношение разности между максимальным и минимальным значениями одноименных экстремумов угловой скорости к ее среднему значению;

– по отдельным цилиндрам – по значениям амплитуд колебаний угловой скорости или избыточных работ на участках разгона в пределах соответствующих углов поворота.

3. Определены недостатки способа диагностирования, понижающие достоверность диагноза:

нестабильная частота прокрутки коленчатого вала стартером – ее зависимость от зарядки аккумулятора и состояния стартера;

наличие методической погрешности измерения значений мгновенных угловых скоростей коленчатого вала из-за наличия гармоник высокочастотных ее колебаний в режиме прокрутки ДВС от динамического взаимодействия зубьев стартера с венцом маховика двигателя.

4. Предложено для повышения точности определения технического состояния ЦПГ путем исключения этих недостатков осуществлять измерения ВИУСКВ при работе ДВС на одном цилиндре с отключенными остальными путем или при осуществлении режима торможения двигателем автомобиля на ровном участке дороги.

5. Результаты экспериментальной проверки предложенного способа подтвердили его эффективность.

Использованные источники:

1. Болдин А.П., Сарбаев В.И. Надежность и техническая диагностика подвижного состава автомобильного транспорта: теоретические основы. – М.: Изд-во МАИИ, 2010. – 206 с.
2. Гребенников А.С., Гребенников С.А., Никитин А.В. Математическая модель внутрициклового изменения угловой скорости коленчатого вала дизеля на холостом ходу // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ. 2013. – №12(115). – С. 42-46.
3. Кривцова Т.И. Совершенствование метода диагностирования компрессионных свойств дизельных двигателей тракторов и автомобилей сельскохозяйственного назначения по характеристикам стартерного тока: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Иркутск: ИРНИТУ, 2011. – 153 с.
4. Ларин О.Н., Куков С.С., Гриценко А.В., Глемба К.В. Результаты диагностирования цилиндропоршневой группы способом оценки динамической компрессии // АПК России. – 2016. – Т. 23. – № 3. – С. 619-625.
5. Альт В.В., Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н. Техническое обеспечение измерительных экспертных систем машин и механизмов в АПК / под ред. В.В. Альта. – Новосибирск: ГНУ СибФТИ СО Рос-сельхозакадемии, 2013. – 523 с.
6. Альт В.В., Савченко О.Ф., Елкин О. В. Цифровая технология оценки мощности тракторного парка сельхоз-предприятия // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. – № 4. – С. 25–31.

УДК 629.051

DOI: 10.26898/agroinfo-2021-248-251

*Дедова М.С., Кириченко А.А., Колточихин Н.Н.,
ФГБОУ ВО НГАУ, г. Новосибирск*

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ ДЛЯ ТРАКТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

В данной статье проведен обобщенный анализ состава тракторного парка сельхозорганизаций России, обозначен ряд проблем и тенденций в переоснащении и обновлении парка сельскохозяйственных тракторов и других машин новой современной техникой. Особое внимание уделено целесообразности использования гибких информационных систем на базе спутниковой навигации для повышения эффективности работы машинно-тракторного парка и технического сервиса АПК. Рассмотрен эффективный способ оперативного контроля технического состояния трактора через систему удаленного мониторинга.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, телематика, навигация, спутниковый мониторинг, техническое обеспечение.

В статье рассмотрено состояние систем мониторинга для сельскохозяйственного производства. Актуальность этой проблемы вызвана необходимостью повышения конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции. А для этого необходимо строго контролировать работу технических средств, выполняющих операции в технологическом процессе сельско-