

Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала

В.В. Нечаев¹, Е.В. Воробьев², А.А. Тарасенко³

¹ Военный институт (инженерно-технический), Санкт-Петербург

² Военная академия материально-технического обеспечения, Санкт-Петербург

³ Публичное акционерное общество «Тутаевский моторный завод», Тутаев

Аннотация: В статье указываются основные недостатки методов диагностирования цилиндропоршневой группы, используемых в настоящее время. Предложены математические зависимости и разработанная на их основе методика технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала.

Ключевые слова: двигатель, цилиндропоршневая группа, сжатие, диагностирование, холодная холостая прокрутка коленчатого вала.

Объектом технического диагностирования может являться машина в целом или ее составные части, например двигатель, ведущий мост, коробка передач и т.п. Параметрами структуры объекта (структурными параметрами) являются физические величины, которые определяют связь и взаимодействие между элементами объекта и его функционирование в целом. В качестве примера можно использовать структурные параметры цилиндропоршневой группы двигателя [1], которыми являются размеры сопряженных поверхностей (гильз, колец, поршня), определяющие зазоры между ними, конусность, эллипсность и т.п.

Свойство объекта, его техническое состояние определяется совокупностью структурных параметров. В сложном объекте, которым, конечно же, является и двигатель, количество структурных параметров может насчитывать тысячи единиц.

В период эксплуатации двигателя, определяется диапазон его технического состояния по поддержанию параметров на необходимом уровне в течение всего срока функционирования. Основные требования

выполнения данного условия: надежность, экономичность и эффективность применения.

Конструкционные элементы приборов, систем и механизмов двигателя, бесспорно, будут претерпевать изменения в процессе эксплуатации, и эти изменения будут не в лучшую сторону. Указанные события могут приводить к внезапным отказам. Необходимая работоспособность достигается строгим соблюдением всех требований инструкций по эксплуатации двигателя, особенно это касается разделов его технического обслуживания. Реальное состояние объекта будет определено в случае, если станут известны значения всех структурных параметров. Если учитывать их количество, то решить задачу по определению технического состоянию объекта практически не представляется возможным. Чтобы упростить эту задачу, и определить техническое состояние объекта, необходимо, из множества структурных параметров выделить и использовать наиболее существенные, те, которые в наибольшей степени влияют на работоспособность объекта.

Техническое диагностирование позволяет решить три основные задачи (ГОСТ 2091-89. Техническая диагностика термины и определения) по поддержанию автомобиля в целом и его составных частей в исправном состоянии: осуществить проверку исправности и работоспособности в целом и (или) составных частей с установленной вероятностью правильности диагностирования, произвести поиск дефектов, нарушивших исправность и (или) работоспособность, определить исходные данные для прогнозирования остаточного ресурса или вероятности безотказной работы объекта диагностирования в межконтрольный период. Таким образом, процесс технического диагностирования может быть определен как процесс получения информации о техническом состоянии объекта с целью управления этим состоянием и поддержания изделия в работоспособном состоянии. Другими словами процесс диагностирования есть ни что иное, как

определение наиболее существенных структурных параметров объекта диагностирования с формированием необходимых выводов о состоянии объекта.

Объем технического диагностирования зависит от целей проверки и остаточного ресурса диагностируемой техники. Остаточный ресурс до выхода единицы техники (агрегата) в ремонт, определяют по формуле [2]:

$$P = A \frac{(D_{\text{п}} - D_{\text{т}})П}{D_{\text{п}} - D_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где P – остаточный ресурс до выхода в ремонт, км; A – постоянный коэффициент, равный 2 – для двигателя и 1 – для агрегатов трансмиссии; $D_{\text{п}}$ – предельное значение диагностируемого параметра; $D_{\text{т}}$ – текущее значение диагностируемого параметра; $D_{\text{и}}$ – исходное значение диагностируемого параметра; $П$ – наработка (пробег) машины с начала эксплуатации, км.

Методы диагностирования автомобильной техники (ее узлов и агрегатов) весьма разнообразны и зависят в основном от физической сущности диагностических параметров, возможностей измерительной техники и т.д.

Различают субъективные и объективные методы диагностирования автомобильной техники [3]. Наиболее распространены в наше время объективные методы диагностирования. Они основаны на измерении и анализе информации о действительном техническом состоянии машины и ее агрегатов контрольно – диагностическими средствами, в то время как субъективные методы основаны на прослушивании, визуальном осмотре работы механизмов.

Большинство используемых методик и технических средств диагностирования [4], работа которых основана на их принципе, обладают схожими, существенными недостатками такими как:

1. Обязательный пуск и прогрев до рабочей температуры двигателя. Однако, в случае, если двигатель не пускается из-за неисправности, либо по другим факторам, то определить техническое состояние ЦПГ двигателя не представляется возможным. Кроме того, пуск, прогрев и диагностирование неисправного двигателя приведёт к обязательному выбросу в атмосферу вредных веществ, что является экологически вредным фактом.

2. Обязательный демонтаж деталей двигателя с их последующей установкой на штатное место, что ведёт за собой увеличение временных и экономических затрат, износ соединительных поверхностей деталей. Кроме того, повышается возможность попадания микрочастиц (песка, пыли и т.п.) во внутренние части двигателя, что при дальнейшей эксплуатации техники будет способствовать скорейшему выходу двигателя из строя.

3. Присутствие в используемых методах визуальных факторов ощущения человека.

4. Необходимость наличия высокой квалификации и определенного опыта у специалиста выполняющего диагностирование.

5. В процессе диагностирования двигатель пускают и он работает в несбалансированном режиме, что в свою очередь может привести к выходу из строя (поломке) деталей кривошипно-шатунного механизма.

6. Возможность использования метода в полной мере, только в случае наличия специального лабораторного оборудования или целой лаборатории.

7. Невозможность использования отдельных методов в полевых условиях.

8. Сложность и большая стоимость применяемого оборудования, отсутствие самокупаемости при его использовании.

Все указанные недостатки определяют поиск путей совершенствования методик и разработку технических средств диагностирования цилиндропоршневой группы двигателей.

Исходным фактором разработки методики диагностирования состояния деталей цилиндропоршневой группы, которая исключала бы все перечисленные недостатки, заключается в том, что при электростартерной прокрутке коленчатого вала на зажимы электродвигателя подается напряжение аккумуляторной батареи. Результатом данного действия является возникновение тока в обмотке якоря стартера. Магнитное поле машины воздействует на ток в проводниках обмотки [2], в результате чего образуется электромагнитный момент $M_{эм}$, заставляющий якорь электродвигателя вращаться. Величина $M_{эм}$ пропорционально зависит от тока в обмотке якоря и магнитного потока

$$M_{эм} = C_m \Phi / \alpha. \quad (2)$$

При вращении якоря и взаимодействии его обмотки с магнитным полем статора в обмотке якоря создается ЭДС самоиндукции. Направления вращения якоря и магнитного потока таковы, что ЭДС в обмотке якоря направлено навстречу току (ее называют встречной ЭДС).

Встречная ЭДС формирует индуктивную составляющую сопротивления и уменьшает ток якоря, а значит и крутящий момент на валу якоря. На технике оснащенной дизелем используют стартеры последовательного возбуждения, так как ток одновременно меняется в обмотке якоря и в обмотке статора. Исходя из этого, изменение тока электродвигателя стартера четко соответствует изменению частоты вращения вала якоря при колебаниях момента сопротивления.

В соответствии с законом Ома [5], для всей цепи напряжения на зажимах электродвигателя больше ЭДС на величину падения напряжения в цепи якоря:

$$U = E_d + I_\alpha \alpha \quad (3)$$

Частота вращения якоря будет постоянной при условии энергетического баланса в виде равенства моментов $M_{эм} = M_c$, где M_c –

момент сопротивления на валу двигателя. Основную долю этого момента составляет момент сопротивления, создаваемый сжатым воздухом при реализации компрессорного цикла в режиме стартерной прокрутки коленчатого вала двигателя.

Умножив обе части равенства (3) на ток $I_{я}$, можно получить баланс мощностей:

$$U I_{я} = E_{д} I_{я} + I_{я}^2 R_{я}. \quad (4)$$

В левой части уравнения баланса находится электрическая мощность на входе (на внешних зажимах) двигателя, правая состоит из двух слагаемых: первое выражает электромагнитную мощность $P_{эм} = E_{д} I_{я}$, второе – мощность потерь в цепи якоря $\Delta P_{я} = I_{я}^2 R_{я}$.

Моменту сопротивления на валу якоря соответствует мощность сопротивления $P_{с} = M_{с} \omega$, где $\omega = 2\pi n/60$ – угловая частота вращения якоря электродвигателя.

Учитывая равенство моментов, получим равенство электромагнитной мощности и мощности сопротивления:

$$P_{эм} = C_{м} \Phi I_{я} \omega = M_{эм} \omega = M_{с} \omega = M_{с} 2\pi n/60 \quad (5)$$

Это равенство показывает, что механическая энергия, передаваемая коленчатому валу от электродвигателя [6], соответствует электрической. Электрическая энергия, поступающая в обмотку якоря электродвигателя, частично преобразуется в теплоту, а большая ее часть преобразуется в механическую энергию и передается на коленчатый вал двигателя при стартерной прокрутке.

Из выше сказанного видно, что изменения электромагнитной мощности соответствует изменению момента сопротивления на валу якоря и определяется его характером. В свою очередь характер момента

сопротивления определяется динамикой изменения давления в рабочей полости при стартерной прокрутке коленчатого вала.

Из термодинамического анализа процесса сжатия можно считать, что давление в рабочей полости при компрессорном сжатии:

$$P_u = P_a \left(\frac{V_a}{V} \right)^n, \quad (6)$$

где P_a – давление в цилиндре в конце наполнения, Па; V_a – полный объем цилиндра, м³; V – текущее значение внутрицилиндрового объема во время впрыскивания, м³; n - показатель политропы сжатия.

Исходя из уравнения кинематики КШМ значение (V) определяется формулой:

$$V = F_n R \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right], \quad (7)$$

где: F_n – площадь поршня, м²; R – радиус кривошипа, м; λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна, м; φ - текущее значение угла поворота КВ относительно ВМТ начала впуска, град.

Из выражения (7) видно, что изменение объема рабочей полости, а значит связанные с ним изменение давления, изменение тока имеют одинаковый характер при компрессорном сжатии.

Для любого поршневого двигателя внутреннего сгорания момент сопротивления при пуске состоит из нескольких слагаемых: момента сопротивления трения, момента потерь на компрессию, или момента насосных потерь, и момента, необходимого для привода различных вспомогательных механизмов двигателя [7]. Момент сопротивления трения карбюраторных двигателей при пусковой скорости и температурах 0 – 5 °С составляет приблизительно 60 % от полного момента сопротивления; при температурах 10 – 20 °С он доходит до 80 – 95 % от полного момента сопротивления. Момент сопротивления, затрачиваемый на вращение

вспомогательных механизмов двигателя составляет при температуре 0°C до 15 % от полного момента сопротивления. Момент потерь на компрессию является второй составляющей и достигает 25 % от полного момента сопротивления.

При проворачивании коленчатого вала одноцилиндрового двигателя момент от компрессии состоит из переменной и постоянной слагаемой. Наибольшего значения момент достигает вблизи ВМТ в такте сжатия. Если же цилиндров несколько, то такты сжатия совпадают повремени с тактами расширения в других цилиндрах, в следствие чего амплитуды пульсации снижаются [8].

При «холодном» прокручивании коленчатого вала двигателя [9] момент сопротивления вращению M_c , можно представить, как сумму момента, учитывающего механические затраты энергии на вращение кривошипно- шатунного механизма и привод вспомогательных механизмов $M_{мех}$, момента сопротивления трению $M_{тр}$ и момента сопротивления на сжатие рабочей смеси $M_{сж}$.

$$M_c = M_{сж} + M_{мех} + M_{тр}. \quad (8)$$

В свою очередь справедливо, что:

$$M_{сж} = f(V_{сж}). \quad (9)$$

где $V_{сж}$ – объем надпоршневой полости.

Объем надпоршневого полости можно представить следующим выражением:

$$V_{сж} = \left[\frac{2R}{\varepsilon - 1} + R(1 + \cos \varphi) + L - \frac{1}{L} \frac{\lambda R}{2} \sin^2 \varphi \right] \frac{\pi d^2}{4}, \quad (10)$$

где $\frac{\lambda R}{2}$ - поправка Брикса; R – длина кривошипа коленчатого вала; φ - угол поворота коленчатого вала; L - длина шатуна; d – диаметр поршня; ε – компрессия в цилиндрах двигателя.

Исходя из выражения 10, объем надпоршневого пространства в цилиндрах двигателя, момент сопротивления на сжатие рабочей смеси, при движении поршня, а, следовательно, и полный момент сопротивления, будут изменяться синусоидально от угла поворота коленчатого вала. Так как в стартерах применяются электродвигатели с последовательным возбуждением, которые имеют квадратичную зависимость момента вращения M_{cm} , то с изменением момента сопротивления при холостом проворачивании коленчатого вала двигателя стартером, синусоидально будет изменяться и ток, потребляемый стартером I_{cm} . Максимумы тока будут соответствовать приходу поршней в верхние мертвые точки. При этом напряжение на аккумуляторной батарее U_{δ} будет изменяться в противофазе току:

$$U_{\delta} = E_{\delta} - I_{cm} \cdot r_{\delta}, \quad (11)$$

где E_{δ} – ЭДС батареи; r_{δ} – внутреннее сопротивление батареи.

Используя математические зависимости, представленные в данной работе, и графики изменения $M_C(\varphi)$ полученные с использованием программы "MathCad", изображенные на рис. 1 с уверенностью делается вывод о синусоидальном изменении $M_C(\varphi)$, при этом состояние ЦПГ дизелей, а как производная от нее и давление в конце такта сжатия, напрямую определяет верхние значения данного момента.

Наибольшее значение амплитуды силы тока, потребляемого стартером, при холостом проворачивании коленчатого вала двигателя, будет соответствовать моменту прихода поршней в верхнюю мертвую точку, можно определить состояние деталей цилиндропоршневой группы двигателя используя следующую методику.

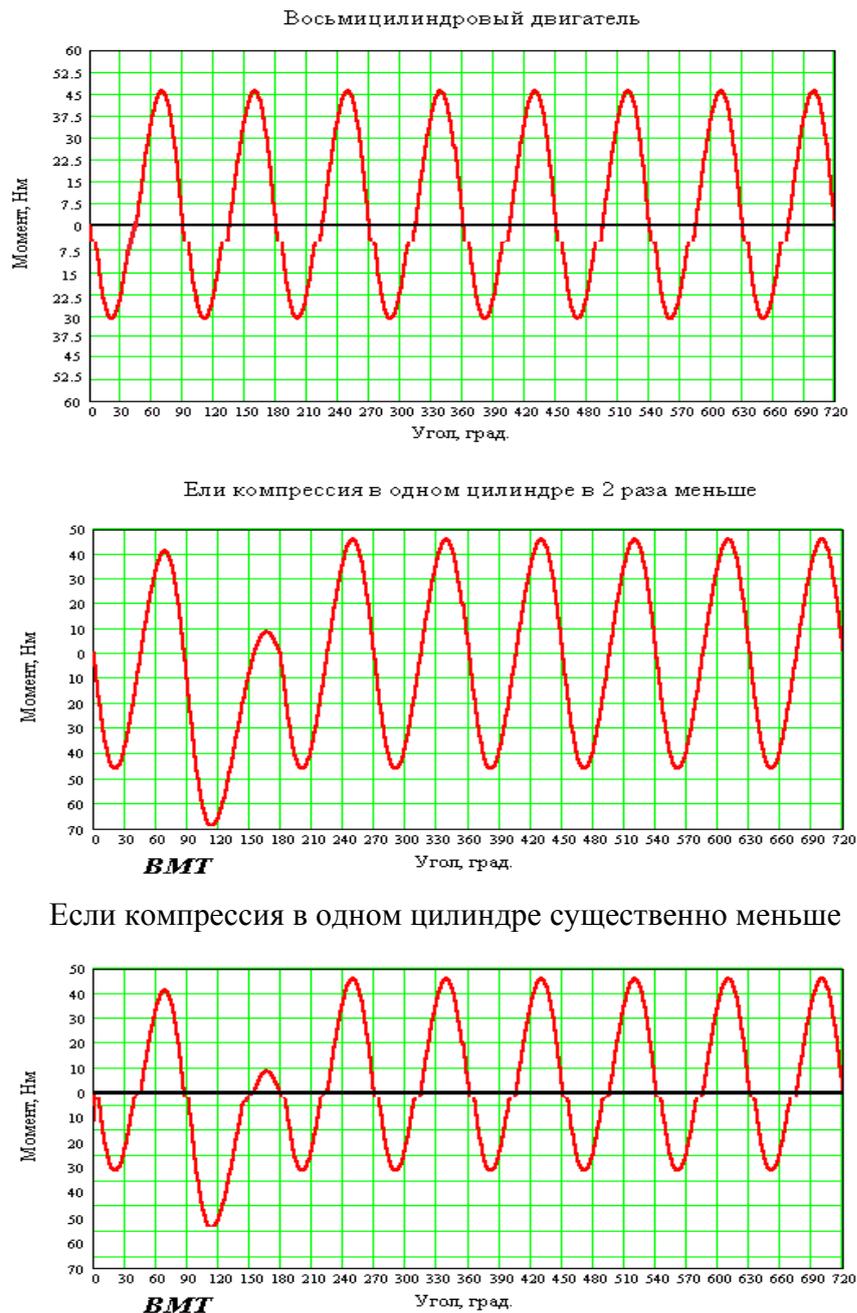


Рис. 1. - Промоделированный при помощи программы "MathCad"
момент сопротивления M_C

1) Автомобиль размещается на ровной поверхности, под колеса подставляются упоры.

2) Системы автомобиля полностью проверены и заправлены, уровень жидкостей согласно нормативно-технической документации.

3) Подключается осциллограф к аккумуляторной батарее, которая заряжена не менее чем на 75%.

4) Выключается цикловая подача топлива путем позиционирования рычага останова ТНВД в соответствующее положение.

5) В кабине автомобиля включается выключатель приборов и стартера (руководством по эксплуатации автомобиля допускается работа стартера до 15 сек), инициируется система электростартерного пуска и коленчатый вал двигателя проворачивается с пусковой частотой вращения.

6) На экране осциллографа появляются фигуры, которые представляют собой синусоиды.

7) Зафиксировав данные фигуры на экране осциллографа, обладающего такой функцией, и сравнивая данную фигуру с эталонной, делаются соответствующие выводы о техническом состоянии деталей цилиндропоршневой группы. В момент прихода поршня в ВМТ на такте сжатия, ток потребляемый стартером будет достигать максимального значения. На осциллограмме данная точка будет соответствовать максимуму[10].

Предложенные математические зависимости и разработанная на их основе методика технического диагностирования цилиндропоршневой группы двигателя холодной пусковой прокруткой коленчатого вала позволяет с достоверной точностью определить техническое состояние деталей цилиндропоршневой группы двигателя при этом практически исключаются все существующие недостатки используемых в настоящее время методов диагностирования.

Литература

1. Смолин А.А., Воробьев Е.В. Техническое диагностирование состояния объектов мобильной техники // Наука и военная безопасность. Научно-практический журнал. Серия 1, 2015. –108 с.
2. Нечаев В.В. М Математические зависимости изменения тока, потребляемого диагностируемым стартером при прокрутке двигателя автомобиля // Вестник Омского государственного технического ун-та. - 2012. – №1. – Омск: ОмГТУ. - 116 – 118 с.
3. Недолужко А.И., Котесова А.А., Детлер М.Ф., Криворотов А.В., Парубец А.Ю. Особенности оценки эффективности деятельности передвижных авторемонтных мастерских при обслуживании автомобильной техники // Инженерный вестник Дона, 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/4363.
4. Афанасьев А.С. Методика повышения достоверности и полноты технического диагностирования дизелей // Проблемы управления рисками в техносфере. Научно-аналитический журнал. № 1. 2014. –56-59 с.
5. Ларионов А.Н. Основы электрооборудования самолетов и автомашин М.: Госэнергоиздат. - 1955. – 384 с.
6. Нечаев В.В. Основные неисправности узлов, систем и механизмов военных гусеничных и колесных машин, устраняемые при проведении текущего, среднего и капитального ремонта. Учебное пособие для ВУЗов. Омский автоброн. инжен. ин-т. – Омск, 2014. – 115 с.
7. Robert Bosch GmbH. Bosch Dianostics Soft. ESI [tronic] Automotive. Diagnosis and Technics: A, C, D, E, F, K, M, P, W. Bosch Automotive Aftermarket. D-76225, Karlsruhe, Published by Bosch Group. Printing: July 2005. 54 p.
8. Детлер М.Ф., Криворотов А.В., Недолужко А.И., Парубец А.Ю. К вопросу применения нормативов планово-предупредительной системы

технического обслуживания и ремонта к современным автомобилям //Инженерный вестник Дона, 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4131

9. Картуков А.Г., Нечаев В.В. Методика определения разброса компрессии в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания при прокрутке коленчатого вала //Двигателестроение –2017. –№1. – с. 31 –33

10. Kardon, B. Incorporating overall probability of system failure into a preventive maintenance model for a serial system B. Kardon, L.D. Fredendall // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2002. – Volume 8, Number 4. – pp. 331-345.

References

1. Smolin A.A., Vorob'ev E.V. Nauka i voennaya bezopasnost'. Nauchno-prakticheskij zhurnal. Omsk: Seriya 1, 2015. 108 p.

2. Nechaev V.V. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo un-ta. 2012. № 1. pp.116-118.

3. Nedoluzhko A.I., Kotesova A.A., Detler M.F., Krivorotov A.V., Parubec A.YU. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/4363.

4. Afanas'ev A.S. Nauchno-analiticheskij zhurnal. 2014. № 1. pp. 56-59.

5. Larionov A.N. Osnovy ehlektrooborudovaniya samoletov i avtomashin [Fundamentals of electrical equipment for aircraft and vehicles]. M.: Gosehnergoizdat. 1955. 384 p.

6. Nechaev V.V. Osnovnye neispravnosti uzlov, sistem i mekhanizmov voennyh gusenichnyh i kolesnyh mashin, ustranyaemye pri provedenii tekushchego, srednego i kapital'nogo remonta [Basic malfunctions of units, systems and mechanisms of military caterpillar and wheeled vehicles, eliminated during current, medium and major repairs]. Uchebnoe posobie dlya VUZov. Omsk, 2014. 115 p.



7. Robert Bosch GmbH. Bosch Dianostics Soft. ESI [tronic] Automotive. Diagnosis and Technics: A, C, D, E, F, K, M, P, W. Bosch Automotive Aftermarket. D-76225, Karlsruhe, Published by: Bosch Group. Printing: July 2005. 54 p.

8. Detler M.F., Krivorotov A.V., Nedoluzhko A.I., Parubec A.YU. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4131

9. Kartukov A.G., Nechaev V.V. Dvigatellestroenie, 2017. №1. pp. 31 –33.

10. Kardon, B. Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2002. Volume 8, Number 4. pp. 331-345.