

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО
ВЕЛИЧИНЕ СУММАРНОЙ ЭДС В ПАРАХ ТРЕНИЯ**

**И.Р. Салахутдинов, А.А. Глущенко, Д.Е. Молочников,
С.Н. Петряков, И.Н. Гаязиев**

Реферат. Исследования проводили с целью определения возможности оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания (ДВС) по величине суммарной электродвижущей силы (ЭДС), возникающей в его парах трения. Площадь контакта трущихся деталей и зазора между ними влияет на электрическое сопротивление в контакте, и, соответственно, на величину возникающей ЭДС согласно установленной зависимости. Для подтверждения теоретических результатов проводили исследования на двигателе УМЗ-417 с помощью разработанного измерительного комплекса изготовленного токосъемного устройства, монтируемого на выходном конце коленчатого вала двигателя. При режиме работы соответствующем частоте вращения коленчатого вала 800 мин⁻¹ суммарная величина ЭДС в цепи измерения гильза цилиндра – блок двигателя – коленчатый вал – токосъемное устройство (ТСУ) составила 83...95 мВ. При этом в паре трения поршень – гильза цилиндров она была равна 37...47 мВ, в парах трения кривошипно-шатунного механизма (коренная шейка – шатун, шатунная шейка – шатун, коренные шейки – блок двигателя) – 46...48 мВ. Соответствие результатов теоретического расчета и стендовых исследований значений величины ЭДС для реального ДВС составило: при измерении с использованием прибора Fluke для узла трения гильза цилиндра – поршень – 62,1 %, для узлов трения кривошипно-шатунного механизма – 83,3...89,6 %; при измерении прибором Vlnet – соответственно 85,5 % и 87,0...93,5 %. Предлагаемый метод определения состояния двигателя по величине, возникающей в его узлах трения ЭДС, может быть использован при техническом диагностировании двигателей.

Ключевые слова: износ, электродвижущая сила (ЭДС), узел трения, микропара, разность потенциалов, двигатель.

Введение. Одной из основных причин снижения работоспособности и ресурса долговечности узлов трения любого механизма можно считать износ его сопрягаемых поверхностей. Это подтверждают результаты многочисленных теоретических и эксплуатационных исследований долговечности работы различных механизмов транспортных машин и их отдельных элементов [1, 2]. Такие изменения геометрических параметров поверхностей трущихся элементов могут быть отнесены к трем основным группам: механическое изнашивание от взаимного контакта двух и более поверхностей под воздействием различных сил и скоростей взаимного перемещения; коррозионно-механическое изнашивание, возникающее под воздействием химических активных сред и материалов; и наименее изученный процесс – изменение параметров поверхностей под воздействием электрического тока. Такое воздействие, несмотря на отсутствие единой теории износа, может быть наиболее информативным в плане определения состояния поверхностей трения и, соответственно, оценки работоспособности не только отдельных узлов и систем, но и агрегата в целом.

Наиболее важный агрегат в транспортных и тяговых машинах – источник их энергии – двигатель. Он состоит из совокупности различных узлов трения, поверхности которых в процессе работы осуществляют различные взаимные перемещения, характеризующие широким спектром нагрузочных и разнонаправленных скоростных режимов. Из теории физики твердого тела известно, что взаимодействие трущихся поверхностей сопровождается влиянием на частицы материала, из которого выполнены

поверхности, вызывая их колебательное и волновое движение. В результате в поверхностных слоях контактирующего материала возникают термоэлектронные явления на атомарном уровне. Также известно негативное влияние электрических токов на противозносные свойства материалов.

Цель работы – определение возможности оценки технического состояния двигателя по значениям электродвижущей силы, возникающей в парах.

Условия, материалы и методы. Нормальный режим работы двигателя сопровождается упругим деформированием выступов материала, которое будет происходить до момента равнодействия суммарной силы прижатия и суммарной силы реакции материала такое воздействие [3, 4, 5]:

$$N = \sum_{i=1}^{n_i} N_i, \quad (1)$$

где n_i – количество выступов вступающих в контакт, ед.;

N_i – сила реакции материала выступа на деформирующую силу в контакте, МПа.

В этом случае площадь поверхности контакта пары взаимодействия при трении:

$$S = \left(\frac{2,2 P_r^{2/3}}{E \cdot h_m^{1/3}} \right) \cdot N^{6/7} \cdot n_o^{1/7}, \quad (2)$$

где P_r – количество вступивших в контакт выступов, ед.;

E – модуль Юнга, Па;

h_m – наибольшая высота контактирующих выступов, мм;

n_o – количество выступов, находящихся на реальной контактируемой поверхности, ед.

При относительном перемещении поверхностей трения как вращательного, так и возвратно-поступательного, в зависимости от назначения узла, трения, в контакте будет возникать электрический ток [6, 7]. Известно, что линия тока искривлена в зависимости от свойств материала и распределения нагрузки в контакте. Это приводит к тому, что она как бы «стягивается» в отдельных зонах материала контакта и «растягивается» (рассеивается) в других. Тогда сопротивление той или иной поверхностей контакта может быть выражено следующим образом:

$$R = \rho \cdot l \cdot \frac{1}{A}, \quad (3)$$

где l – динамика длины контактной пары, мм;

ρ – удельное сопротивление материала, Ом·мм;

A – площадь поверхности, вступившей в контакт, мм².

Согласно формуле (3), сопротивление поверхностей материала в контактной зоне будет не одинаковым. В частности в зоне «стягивания» оно будет определяться выражением:

$$R = \frac{0,45 \cdot \rho \cdot E^{5/7} \cdot h^{4/7}}{r^{1/7} \cdot N^{5/7} \cdot n_o^{1/4}}. \quad (4)$$

где r – среднее значение радиуса выступа контактируемой поверхности, мм;

h – высота выступов на контактирующих поверхностях, мм.

В силу того, что элементы энергетической установки транспортной машины совершают различные разнонаправленные перемещения одних поверхностей в контакте относительно других, а также в связи с тем, что эти контакты разделяются смазочной средой для предотвращения сближения и снижения износных явлений ее можно рассматривать как типологическую систему. В этом случае любой из контактов двигателя представляет собой

трехэлементную систему I металл – III смазочный материал – II металл. Поскольку в смазочном материале всегда будут присутствовать вещества различной химической активности, частицы растворенной воды и продуктов трения, то он будет обладать свойствами электролита. Следовательно, такую систему можно считать электрохимической и применять к ней основные законы электрохимии (рис. 1).

С учетом такой теории работу узла трения можно описать следующим образом. Поскольку процесс взаимодействия двух поверхностей сопровождается деформированием отдельно взятых выступов на той или иной поверхности при их относительном перемещении одна относительно другой, то в присутствии смазочного материала, обладающего определенными свойствами электролита, в момент контакта выступов будут образовываться микрогальванические пары [8, 9, 10].

При этом в момент разъединения выступов и разрушения гальванической микропары между металлами будет возникать контактная разность потенциалов (φ_{II}), а на границе смазочного материала в контакте с поверхностями трения – разность потенциалов φ_{III} и φ_{II} . То есть в момент разрыва контакта будет формироваться электродвижущая сила (ЭДС). А она, в свою очередь, будет способствовать возникновению в контакте окислительно-восстановительной реакции, результатом которой становится повышенный износ поверхностей контакта.

Так как разность потенциалов – это результат энергии, идущей на обеспечение выхода носителя заряда из материала поверхности трения или смазочного материала, для рассматриваемой электрохимической схемы ее значение будет выражаться как:

$$\varphi = W_I - W_{III} - W_{II}, \quad (5)$$

где W_I – энергия выхода носителя заряда из материала поверхности I;

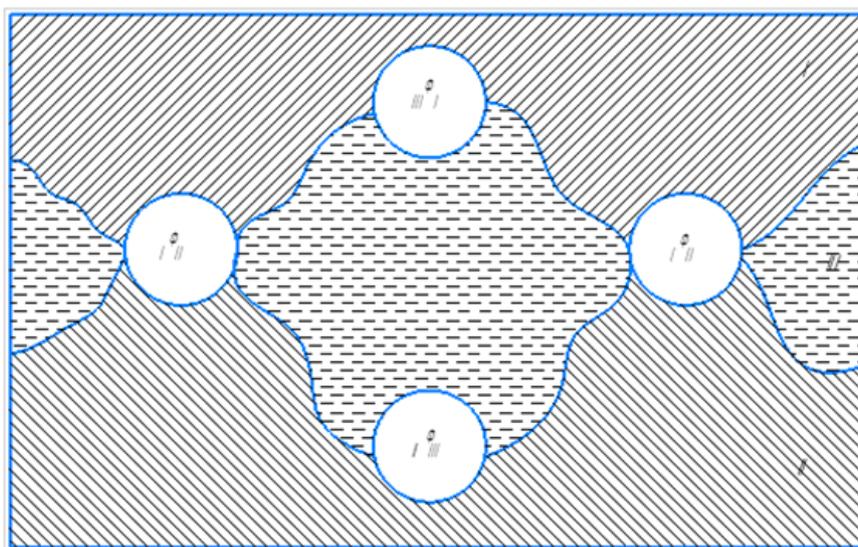


Рис. 1 – Схема электрохимической системы узла трения:
I– металл (материал) первой трущейся поверхности; II– металл (материал) второй трущейся поверхности; III–смазочный материал (электролит).

W_{II} – энергия выхода носителя заряда из материала поверхности трения II ;

W_{III} – энергия выхода носителя заряда из смазочного материала III .

Учитывая то, что температура в узле трения величина не постоянная:

$$\varphi = W_I - W_{III} - W_{II}, \quad (6)$$

где K – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – температура в узле трения, К;

E – заряд электрона, Кл;

n_1 и n_2 – соответственно, концентрация электронов в материалах поверхностей трения, m^{-2} .

Сделав допущение, что температура смазочного материала будет иметь температуру одной из поверхностей трения в узле, получим:

$$\varphi = \varepsilon = \frac{K}{e} (T_I - T_{II}) \ln \frac{n_2}{n_1}. \quad (7)$$

Тогда, ε представляет собой термоэлектродвижущую силу.

Рассматривая выражение (7) можно констатировать, что величина электрического тока, возникающая в узле трения, будет определяться характеристиками трущихся поверхностей и температурой в контакте.

Процесс работы узла трения можно представить следующим образом. Начальный период работы сопряжения сопровождается снижением энергии на поверхности материала трения, что облегчает выход электронов (носителей заряда) [11]. Это приводит к увеличению разности потенциалов в рассматриваемой системе и активации электрохимических процессов, а наличие химически активного смазочного материала при работе трибоузла приводит к формированию на поверхностях трения окислительных пленок. Это сопровождается адсорбционным снижением прочности поверхности контактируемого материала, и как следствие, увеличением ее износа.

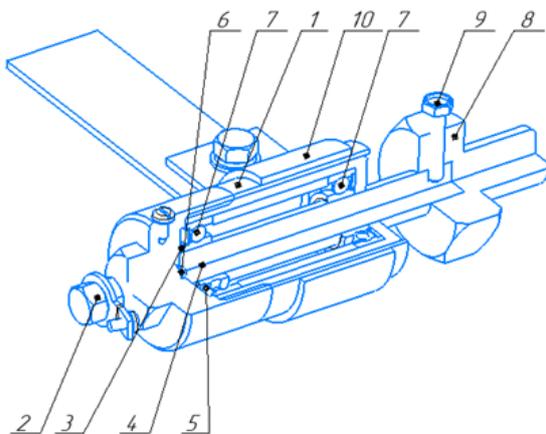


Рисунок 2 – Схема токосъемного устройства:

1 – корпус, 2 – неподвижный контакт, 3 – слой жидкого металла, 4 – подвижный контакт, 5 – кольцевая полость, 6 – шарик из стали Ст3, 7 – подшипники, 8 – переходный контакт, 9 – винт, 10 – хомут.

Таким образом, изменения основных прочностных свойств материалов поверхностей трения, прежде всего, связаны с возникновением ЭДС и электрического тока в работающем контакте [6, 12].

Исходя из этого, рассматриваемую электрохимическую систему можно представить как конденсатор с напряженностью поля (E). В этом случае заряд одной из поверхностей трения можно выразить через величину расстояния между обкладками конденсатора, то есть расстояния между контактируемыми поверхностями узла трения:

$$q = \varepsilon_0 \frac{S}{s} \varepsilon, \quad (8)$$

где S – площадь поверхности контакта, mm^2 ;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды в зазоре;

s – расстояние между контактируемыми поверхностями, мм.

Тогда зависимость ЭДС от величины зазора между трущимися поверхностями примет вид:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 S q}{s} = \frac{\varepsilon_0 \left(\frac{2,2 T_I^{2/3}}{E \cdot h_m^{1/3}} \right) \cdot N^{6/7} \cdot n_o^{1/7} q}{s}. \quad (9)$$

Результаты анализа этого выражения свидетельствуют, что величина возникающей ЭДС будет снижаться с увеличением расстояния между поверхностями трения. Установленная аналитическая зависимость позволяет сделать предположение о возможности определения размеров зазора в узлах трения двигателя по величине, возникающей в этом узле ЭДС, и использовать такой метод для диагностирования узлов и сопряжений агрегатов.

Экспериментальные исследования проводили на двигателе УМЗ-417, установленном на тормозном стенде КИ-5717.

ЭДС определялись использованием измерительного комплекса и специально разработанного токосъемного устройства (рис. 2, 3), установленного на выходном конце коленчатого вала двигателя. Для приема и передачи электрических сигналов с вращающейся поверхности коленчатого вала к измерительному устройству использовался контакт из жидкого металла.

Внутри корпуса токосъемного устройства 1 размещен неподвижный контакт 2, взаимодействие которого с подвижным контактом 4 осуществляется через слой жидкого металла 3. Жидкий металл помещен внутрь кольцевой полости 5, которая расположена между контактами 2 и 4. Также между этими контактами на продольной оси симметрии корпуса токосъемного устройства установлен шарик 6 из стали Ст3, все время находящийся в слое жидкого металла 3. Ось токосъемного устройства установлена на подшипниках 7, запрессованных в обойме подвижного контакта 4. Переходный контакт 8 предназначен для соединения коленчатого вала двигателя с осью токо-

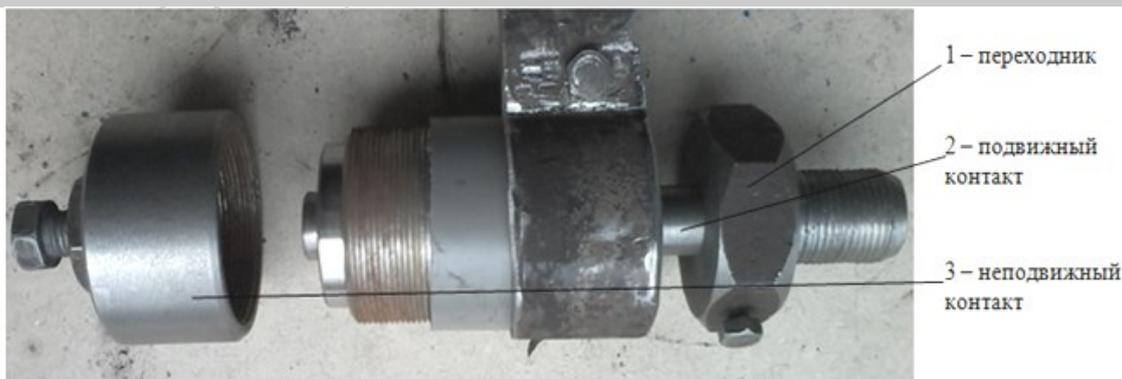


Рис. 3– Внешний вид разработанного токосъёмного устройства.

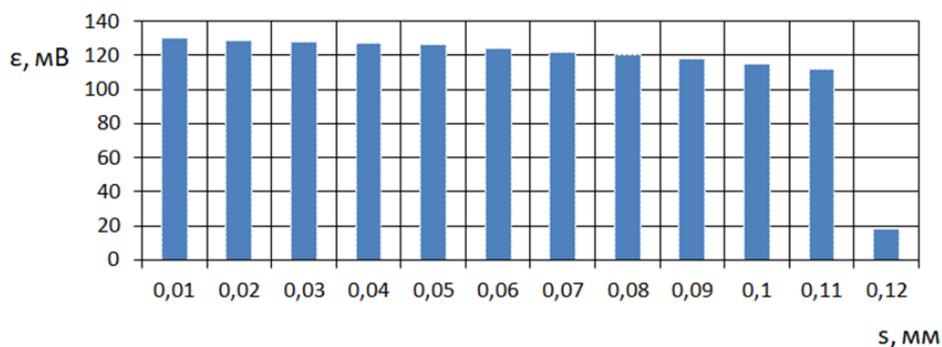


Рис. 4 – Теоретическая зависимость ЭДС (ε) от величины зазора (s) в сопряжении трущегося узла

съемного устройства. Он фиксируется на валу винтом 9. Для предотвращения прокручивания токосъемного устройства и гашения возникающих колебаний на корпус 1 устанавливается хомут 10 с прокладкой из резинового материала толщиной 2...4 мм.

Работа с токосъемным устройством (рис. 3) осуществляется в следующем порядке. Переходник 1 токосъемного устройства устанавливается на коленчатый вал двигателя и фиксируется винтом. Контакт 2 соединяется с измерительным комплексом. После проверки электрической цепи осуществляется пуск двигателя. При его работе в парах сопряжений узлов «гильза цилиндра –поршневое кольцо–поршень–элементы кривошипно-шатунного механизма–коленчатый вал двигателя» возникает электродвижущая сила. Электрическая величина ее сигнала в виде импульса с коленчатого вала через подвижный контакт 2 слой жидкого металла, стальной шарик и неподвижный контакт 3 передается на милливольтметр.

Для повышения достоверности результатов исследований использовали два типа измерительных приборов Fluke и Vlnet. Эксперименты проводили при частоте вращения коленчатого вала 800 мин⁻¹, соответствующей холостому ходу ДВС, которая наиболее приемлема для оценки технического состояния двигателя в условиях пунктов диагностики. В процессе проведения исследований поддерживали нормативные показатели двигателя: удельный расход топлива– 296 г·л.с./ч, температура охлаждающей жидкости в системе охлаждения–85 °С, темпера-

тура картерного масла в системе смазки двигателя – 90 °С, температура воздуха в помещении размещения исследовательского стенда – 20 °С, температура отработавших газов – 420 °К, нагрузка на двигатель – 100 Н·м. Перед началом проведения измерений проводили тарировку измерительных приборов Fluke и Vlnet, а также используемого токосъемного устройства

Для определения зависимости ЭДС от величины зазора в измеряемых парах трения после проведения стендовых испытаний двигатель подвергали разборке. После этого измеряли зазоры в исследуемых узлах трения двигателя методом микрометрирования с использованием микрометра (ГОСТ17215-71).

Для подтверждения полученных аналитических зависимостей было определено изменение величины ЭДС в зависимости от изменения величины зазора между поверхностями узла трения. В расчетах использовали нормативные величины зазоров узлов трения двигателя Ульяновского моторного завода УМЗ-417.

Анализ и обсуждение результатов. Графически (рис. 4) изменение величины ЭДС от зазора в сопряжении трущегося узла описывается степенной функцией вида:

$$\varepsilon = 172,58s^{-0,3009} \tag{10}$$

По результатам исследований, используя при их обработке правило суммирования ЭДС в электрических цепях, были установлены величины этого показателя по отдельным узлам трения испытуемого двигателя (см. табл.).

При использовании прибора Fluke соответствие теоретически рассчитанной ЭДС и измеренной в ходе стендовых исследований на

Таблица 1 – Показания ЭДС цепи по узлам трения при стендовых испытаниях двигателя в зависимости от фактического зазора в сопряжениях

Прибор	Частота вращения коленвала, мин ⁻¹	Узлы трения						Суммарная ЭДС, мВ ≈
		поршень – гильза цилиндра			блок двигателя – коленчатый вал*			
		зазор, мм	ЭДС, мВ ≈		зазор, мм	ЭДС, мВ ≈		
			теоретическая	фактическая		теоретическая	фактическая	
Fluke	800	0,18	32	47	0,050... 0,072	43...40	48	95
V1net	800	0,18	32	37	0,050... 0,072	43...40	46	83

реальном ДВС для узла трения гильза цилиндра – поршень составило 62,1 %, для узлов трения кривошипно-шатунного механизма (коренная шейка – шатун, шатунная шейка – шатун, коренные шейки – блок двигателя) – 83,3...89,6 %. При измерении прибором V1net величины этих показателей были равны соответственно 85,5 % и 87,0...93,5 %. Таким образом, более точные результаты обеспечивало использование измерительного прибора V1net.

Выводы. Теоретически установлено с увеличением зазора в парах трения двигателя величина возникающей ЭДС уменьшается со 130 мВ при зазоре 0,01 мм до 18 мВ при зазоре 0,12 мм. Например, в сопряжении поршень

– гильза цилиндров при нормативном значении зазора 0,15 мм величина ЭДС должна составлять 97 мВ, а при фактическом значении 0,18 мм составила 47 мВ. Таким образом, зная значение величины ЭДС, соответствующие нормативной величине зазора, можно не только оценить состояние сопряжений двигателя при проведении измерений, но и прогнозировать остаточный ресурс работы отдельных пар трения двигателя в целом. Предлагаемый метод определения состояния двигателя по величине, возникающей в его узлах трения ЭДС, может быть использован при техническом диагностировании не только двигателей, но и других агрегатов машин.

Литература

1. Процесс образования контактной разности потенциалов в сопряжении «поршневое кольцо – гильза цилиндров» / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глушенко, М. М. Замальдинов и др. // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: мат. III международной науч.-практ. конф. Пенза: РИО ПГАУ, 2017. С. 128–130.
2. Рыжкин А.А., Бурлаков В.Э. Об электрических явлениях при трении // Вестник ДГТУ. 2011. Т.11. № 9. С. 1564–1573.
3. Методы управления трением и изнашиванием материалов в условиях возникновения контактной разности потенциалов / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глушенко, М. М. Замальдинов и др. // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: мат. III международной науч.-практ. конф. Пенза: РИО ПГАУ, 2017. С. 125–127.
4. The improvement of the technique for determining technical condition of repair and maintenance equipment / D. Molochnikov, R. Khalimov, I. Gayaziev, et al. // E3S Web of Conferences. VIII International Scientific and Practical Conference «Innovative technologies in science and education», 2020. P. 806 – 828.
5. Technological process and manufacture cost of metalized cylinder shell // A. K. Subaeva, A. A. Zamaidinov, M. I. Subaev, et al // J FundamApplSci. 2017. No.9(1S). P. 1956–1963.
6. Уханов Д.А., Уханов А.П., Перов В.А. Наведённая ЭДС – критериальный показатель минимальной частоты вращения коленчатого вала поршневого ДВС // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. №1 (41). С. 21–25.
7. Подмастерьев К.В. Состояние и инструментальное обеспечение электрических методов мониторинга узлов трения // Известия ТулГУ: Технические науки. 2012. № 7. С. 221–234.
8. Иванова Е.И., Мишаков В.С., Обухова И.А. Исследование температурной зависимости контактной разности потенциалов в металлах. М.: Энергия, 2018. 46 с.
9. Токосъёмное устройство / Салахутдинов И.Р., Глушенко А.А., Лисин А.В. и др. // Патент РФ № 196570, 05.03.2020.
10. Accelerated tests of cylinder-piston group for friction and wear / A. K. Subaeva, A. A. Zamaidinov, M. I. Subaev, et al // J FundamApplSci. 2017. No.9. P. 1964–1973.
11. Theoretical justification of geometrical dimensions, grade angle, and quantity of screw lines during cylinder liner metallization / A. A. Zamaidinov, A. K. Subaeva, A. A. Subaev, et al // Astra Salvensis. 2017. No.5. P. 505–511.
12. Результаты моторных испытаний экспериментального бензинового двигателя внутреннего сгорания / Д.М. Марьян, И.Р. Салахутдинов, Д.Е. Молочников и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета: Казанский ГАУ. 2019. № 4-2 (56). С. 64–68.

Сведения об авторах:

Салахутдинов Ильмас Рифкатович – кандидат технических наук, доцент; e-mail: ilmas.73@mail.ru
 Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, г. Ульяновск, Россия
 Глушенко Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент; e-mail: oieldel@yandex.ru
 Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия
 Молочников Денис Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент; e-mail: denmol@yandex.ru
 Петряков Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент; e-mail: gsspsn@mail.ru
 Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, г. Ульяновск, Россия
 Газиев Ильнар Наилевич – кандидат технических наук, доцент; e-mail: gazel.81@mail.ru
 Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY THE VALUE OF THE TOTAL EMF IN FRICTION PAIRS
I.R. Salakhutdinov, A.A. Glushchenko, D.E. Molochnikov, S.N. Petryakov, I.N. Gayaziev

Abstract. The research was carried out in order to determine the possibility of assessing the technical condition of an internal combustion engine (ICE) by the value of the total electromotive force (EMF) that occurs in its friction pairs. The contact area of the rubbing parts and the gap between them affects the electrical resistance in contact, and, accordingly, the value of the resulting EMF according to the established dependence. To confirm the theoretical results, studies were carried out on the UMP-417 engine using a developed measuring complex and a manufactured current-collecting device mounted on the output end of the engine crankshaft. With the operating mode corresponding to the speed of the crankshaft 800 min⁻¹, the total value of the EMF in the measurement circuit cylinder liner-engine block-crankshaft-current collector (TSU) was 83...95 mV. At the same time, in the piston-cylinder liner friction pair, it was equal to 37 ... 47 mV, and in the crank mechanism friction pairs - 46...48 mV. The correspondence of the results of the theoretical calculation and bench studies of the values of the EMF value for a real internal combustion engine was: when measured using the Fluke device for the friction unit of the cylinder liner-piston – 62.1 %, for the friction units of the crank mechanism (root neck-connecting rod, connecting rod neck-connecting rod, root neck-engine block) - 15.1 %. When measured by the VInet device, for the cylinder liner – piston friction unit-85.5 %, for the crank mechanism friction units (root neck-connecting rod, connecting rod neck-connecting rod, root necks-engine block) - 93.2 %. The proposed method for determining the state of the engine by the value that occurs in its EMF friction nodes can be used in the technical diagnostics of engines.

Keywords: wear, EMF, host friction micropore, the potential difference engine.

References

1. Salakhutdinov IR, Glushchenko AA, Zamal'dinov MM. Protssess obrazovaniya kontaktnoi raznosti potentsialov v sopryazhenii "porshnevoe kol'tso – gil'za tsilindrov". Eksploatatsiya avtotraktornoi i sel'skokhozyaistvennoi tekhniki: opyt, problemy, innovatsii, perspektivy: mat. III mezhdunarodnoi nauch.-prakt.konf. [The process of a contact potential difference formation in the conjugation "piston ring - cylinder liner". Operation of automotive and agricultural machinery: experience, problems, innovations, perspectives: proceedings of III International scientific and practical conference]. Penza: RIO PGAU. 2017; 128-130 p.
2. Ryzhkin AA, Burlakov VE. [On electrical phenomena during friction]. Vestnik DGTU. 2011; 11 (9): 1564–1573 p.
3. Salakhutdinov IR, Glushchenko AA, Zamal'dinov MM. Metody upravleniya treniem i iznashivaniem materialov v usloviyakh vozniknoveniya kontaktnoi raznosti potentsialov. Eksploatatsiya avtotraktornoi i sel'skokhozyaistvennoi tekhniki: opyt, problemy, innovatsii, perspektivy: mat. III mezhdunarodnoi nauch.-prakt.konf. [Methods for controlling friction and wear of materials in conditions of contact potential difference. Operation of automotive and agricultural machinery: experience, problems, innovations, prospects: proceedings of III International scientific and practical conference]. Penza: RIO PGAU. 2017; 125-127 p.
4. Molochnikov D, Khalimov R, Gayaziev I. The improvement of the technique for determining technical condition of repair and maintenance equipment. E3S Web of Conferences. VIII International scientific and practical conference "Innovative technologies in science and education". 2020; 806-828 p.
5. Subaeva AK, Zamaidinov AA, Subaev MI. Technological process and manufacture cost of metalized cylinder shell. J FundamApplSci. 2017; 9 (1S): 1956-1963 p.
6. Ukhanov DA, Ukhanov AP, Perov VA. [Induced EMF is a criterion indicator of the minimum crankshaft speed of a piston internal combustion engine]. Vestnik Ulyanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2018; 1 (41): 21-25 p.
7. Podmaster'ev KV. [State and instrumental support of electrical methods for monitoring friction units]. Izvestiya TulGU: Tekhnicheskie nauki. 2012; (7): 221-234 p.
8. Ivanova EI, Mishakov VS, Obukhova IA. Issledovanie temperaturnoi zavisimosti kontaktnoi raznosti potentsialov v metallakh. [Study of the temperature dependence of the contact potential difference in metals]. Moscow: Energiya. 2018; 46 p.
9. Salakhutdinov IR, Glushchenko AA, Lisin AV. Tokos'emnoe ustroystvo. [Current collecting device]. Patent RF № 196570, 05.03.2020.
10. Subaeva AK, Zamaidinov AA, Subaev MI. Accelerated tests of cylinder-piston group for friction and wear. J FundamApplSci. 2017; (9): 1964-1973 p.
11. Zamaidinov AA, Subaeva AK, Subaev AA. Theoretical justification of geometrical dimensions, grade angle, and quantity of screw lines during cylinder liner metallization. Astra Salvensis. 2017; (5). P. 505–511.
12. Mar'in DM, Salakhutdinov IR, Molochnikov DE. [Results of motor tests of an experimental gasoline internal combustion engine]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta: Kazanskii GAU. 2019; 4-2 (56): 64-68 p.

Authors:

Salakhutdinov Ilmas Rifkatovich - Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ilmas.73@mail.ru
 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agricultural University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russia
 Glushchenko Andrey Anatolevich - Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: oildel@yandex.ru
 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education " Ulyanovsk State University», Ulyanovsk, Russia
 Molochnikov Denis Evgenievich - Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: denmol@yandex.ru
 Petryakov Sergey Nikolaevich - Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: gsspsn@mail.ru
 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agricultural University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russia
 Gayaziev Ilnar Nailevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: gazel.81@mail.ru
 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia