

УДК 629.1

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Абдрашитов А.Д., магистрант, тел. 89278243677,
damirvasa14@gmail.com

Салахутдинов И.Р., кандидат технических наук, доцент,
тел. 8(8422) 55-95-13, ilmas.73@mail.ru

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Глушченко А.А., кандидат технических наук, доцент,
тел. 89374564933, oildel@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»

Ключевые слова: участок цепи, электродвижущая сила, физическая величина, разность потенциалов, потенциометр, проводник, контакт.

Работа посвящена рассмотрению вопроса компенсационного метода определения ЭДС основан на уравнивании измеряемой ЭДС источника (E_x) напряжением, создаваемым на известном сопротивлении током от вспомогательного источника. Метод широко используется для точного измерения ЭДС гальванических элементов, аккумуляторов, а также в потенциометрах для измерения малых напряжений. При этом установлено, что для реализации измерений ЭДС в двигателях внутреннего сгорания его использование невозможно, в частности по причине наличия вращающихся и возвратно-поступающих движений деталей.

Введение. Среди методов контроля узлов трения наиболее высокими темпами развития характеризуются электрические способы, базирующиеся на измерении электрического сопротивления, емкости, термоэлектродвижущей силы и электромагнитной эмиссии в зоне трения контактного контакта, что обусловлено их признанной перспективностью (рис. 1).

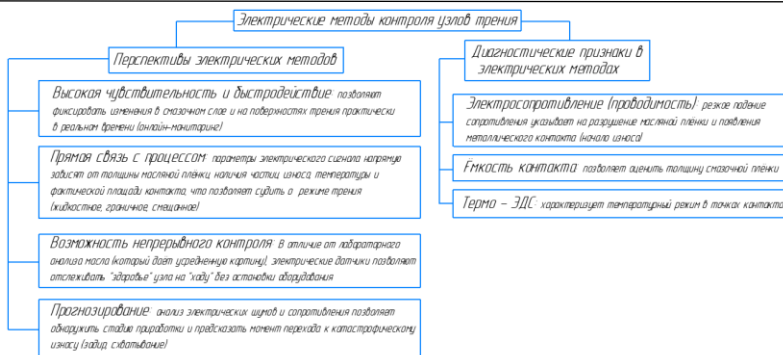


Рисунок 1 – Электрические методы контроля узлов трения

Следовательно, развитие электрических методов диагностики обеспечивает переход от планово-предупредительного обслуживания машин к обслуживанию по их фактическому техническому состоянию, что позволяет существенно сократить эксплуатационные издержки. [1,2].

Материалы и методы исследований. Интенсивное развитие электрических методов трибодиагностики обусловлено совокупностью их преимуществ. К числу основных достоинств относятся [3]:

- *высокая чувствительность к зарождающимся дефектам* (электрические методы, включая измерение электросопротивления, ёмкости смазочной плёнки и экзoeлектронной эмиссии, позволяют выявлять микроповреждения поверхности на ранних стадиях, опережая вибрационный контроль);

- *оперативность и возможность проведения онлайн-мониторинга* (диагностика в реальном времени без остановки и разборки оборудования, что особенно важно для ответственных узлов);

- *прямая оценка качества смазочного слоя* (непосредственное измерение толщины и сплошности смазочной плёнки в зоне EHD - контакта для определения режима трения);

- *высокая точность контроля* (например, вольтамперометрия обеспечивает точное определение степени деградации смазочных материалов, наличия загрязнений, воды и металлических частиц — продуктов износа);

- *автоматизация и простота обработки данных* (электрические сигналы легко оцифровываются и анализируются автоматизированными системами, что снижает влияние человеческого фактора);

- *универсальность* (применимость для различных узлов трения, включая подшипники и зубчатые передачи, особенно при наличии систем смазки).

Применение указанных методов способствует снижению эксплуатационных расходов, увеличению межсервисных интервалов и предотвращению аварийных ситуаций.

Для измерений электрических величин используются электроизмерительные приборы, классифицируемые прежде всего по измеряемой или воспроизводимой физической величине: сила тока измеряется амперметром, напряжение — вольтметром или потенциометром, сопротивление — омметром. Функции указанных приборов объединяют комбинированные устройства — мультиметры, тестеры, авометры. Классификация существующего многообразия измерительных приборов может быть проведена по различным признакам (рис. 2).

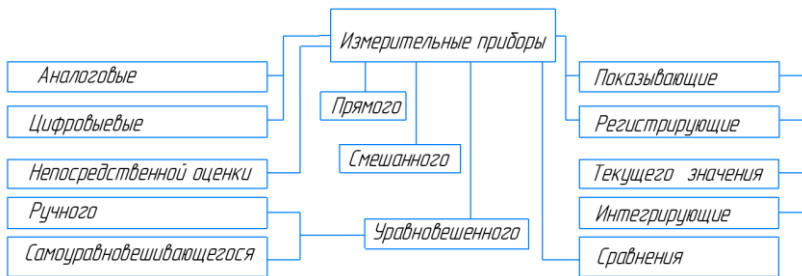


Рисунок 2 - Классификация средств измерений ЭДС

В процессе измерений любым прибором реализуется операция сравнения исследуемой величины с однородной величиной, принятой за единицу. В зависимости от способа сравнения, заложенного в принцип действия приборов, последние подразделяются на приборы сравнения (в которых измерение осуществляется посредством сравнения с мерой) и приборы непосредственной оценки, оснащённые шкалой, предварительно градуированной в единицах измеряемой

величины. Кроме того, данные типы приборов различаются также по своей структурной организации.

Результаты исследований и их обсуждение. Важной характеристикой источника тока является электродвижущая сила (обозначаемая $\mathcal{E}$), которая по определению численно равна работе сторонних (некулоновских) сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника.

Напряжением на участке цепи называется физическая величина, равная суммарной работе, совершаемой кулоновскими и сторонними силами на данном участке [4]:

$$U = \Delta\varphi + \mathcal{E}. \quad (1)$$

Так как $U = Ir$ (закон Ома), то при отсутствии тока через источник имеем:

$$\mathcal{E} = |\Delta\varphi|. \quad (2)$$

Таким образом, электродвижущая сила источника равна разности потенциалов (не путать с напряжением) между его клеммами в условиях отсутствия тока. Ток через источник не протекает либо при разомкнутой цепи, либо при компенсации ЭДС внешней разностью потенциалов, создаваемой другим источником.

Метод измерения ЭДС, основанный на компенсации электродвижущей силы источника, приложенной к его полюсам внешней разностью потенциалов, называется компенсационным.

Необходимая для компенсации разность потенциалов получается с помощью потенциометра (делителя напряжения). Принципиальная схема потенциометра представлена на рис. 3. Вспомогательный источник тока замыкается на проводник с достаточно большим сопротивлением.

В проводнике возникает ток, при этом каждая его точка приобретает вполне определённый потенциал (в направлении от A к B потенциал понижается). Если U_{AB} — разность потенциалов между концами A и B проводника, то разность потенциалов U_{AC} между точками A и C определяется выражением:

$$U_{AC} = \frac{R_{AC}}{R_{AB}} U_{AB}, \quad (3)$$

где R_{AC} — сопротивление участка, R_{AB} — сопротивление проводника.

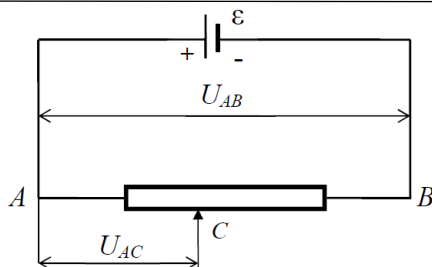
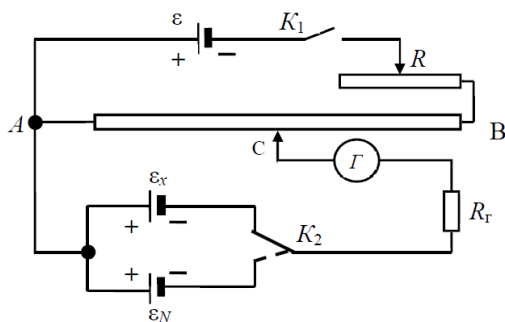


Рисунок 3 - Принципиальная схема потенциометра



ε – вспомогательный источник тока, питающий потенциометр; ε_x – исследуемый источник тока – гальванический элемент Грене; ε_N – источник с известной ЭДС – ртутно-кадмиевый нормальный элемент Вестона (ЭДС при 20 °С равна 1,0186 В); Γ – нуль-гальванометр; R – реостат, регулирующий ток в потенциометре; R_{Γ} – сопротивление, предохраняющее гальванометр от перегрузок в нескомпенсированной схеме; K_2 – переключатель для попеременного включения источников ε_x и ε_N ; K_1 – ключ для включения цепи; AB – реохорд (потенциометр).

Используются как линейные, так и барабанные реохорды.

Рисунок 4 - Схема электрической цепи для измерения ЭДС

Перемещением контакта C от точки A к точке B можно получить любое значение разности потенциалов в диапазоне от 0 до U_{AB} , при этом абсолютная величина U_{AB} всегда меньше ЭДС вспомогательного источника.

Потенциометр конструктивно выполнен в виде калиброванной проволоки, натянутой на изолирующую основу, по которой

перемещается скользящий контакт; такое устройство называется реохордом. В реохорде однородная проволока намотана по цилиндрической спирали, а токосъёмник скользит по спирали, поворачиваясь вокруг оси вращения на определённый угол. В данном случае длина проволоки на участке AC пропорциональна углу поворота токосъёмника φ .

Принципиальная схема электрической цепи для измерения ЭДС компенсационным методом приведена на рис. 2. Указанная схема позволяет определить ЭДС исследуемого источника без прямого измерения компенсирующей разности потенциалов.

Первоначально к потенциометру подключают исследуемый источник ε_x согласно представленной на схеме полярности — встречно по отношению к вспомогательному источнику ε . Вращением токосъёмника потенциометра устанавливают такое положение S_x , при котором ток в гальванометре, а следовательно, и в источнике ε_x отсутствует (что является необходимым и достаточным условием компенсации). На основании второго правила Кирхгофа для контура $AC_x \varepsilon_x A$ справедливо следующее соотношение:

$$IR_x = \varepsilon_x, \quad (4)$$

где R_x — сопротивление участка AC_x потенциометра; I — ток в этом участке.

В указанном контуре падение напряжения имеет место только на сопротивлении R_x . Далее к потенциометру подключают источник ε_N с известной электродвижущей силой (исследуемый источник при этом отключается), после чего вновь добиваются состояния компенсации. Применяя второе правило Кирхгофа к новому контуру, можно записать:

$$IR_N = \varepsilon_N, \quad (5)$$

где R_N — сопротивление участка AC_N , соответствующего компенсации ε_N .

В состоянии компенсации ток протекает исключительно по цепи, содержащей потенциометр, причём его величина соответствует ситуации, когда компенсируемый источник полностью отсутствует, то есть:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{AB} + r}, \quad (6)$$

где R_{AB} — сопротивление потенциометра; r — внутреннее сопротивление вспомогательного источника.

Заметим также, что компенсация ε_X и ε_N возможна только в том случае, если ЭДС вспомогательного источника ε больше ε_X и ε_N (точнее, разность потенциалов $|U_{AB}| > |\varepsilon_X|$ и $|U_{AB}| > |\varepsilon_N|$).

Из формул (3) и (4) следует:

$$\varepsilon_X = \frac{R_X}{R_N} \varepsilon_N, \quad (7)$$

Таким образом, для определения ЭДС исследуемого источника тока необходимо знать ЭДС некоторого эталонного источника и отношение сопротивлений R_X и R_N . Если потенциометр представляет собой реохорд, то отношение $\frac{R_X}{R_N}$ можно заменить отношением длин l_X и l_N , соответствующих этим сопротивлениям:

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{l_X}{l_N}. \quad (8)$$

Подставляя это выражение в формулу (7),

$$\varepsilon_X = \frac{l_X}{l_N} \varepsilon_N \quad (9)$$

или

$$\varepsilon_X = \frac{\varphi_X}{\varphi_N} \varepsilon_N \quad (10)$$

где φ_X и φ_N – соответствующие отсчеты угла поворота токосъемника потенциометра [4].

Следует отметить, что, несмотря на широкое внедрение существующих методов и средств трибодиагностики в различных отраслях промышленности, применительно к эксплуатации автомобильного транспорта и, в частности, автомобильных двигателей, данные методы и средства нуждаются в дальнейшем развитии [5,6].

Закключение. Для точного измерения электродвижущей силы в условиях двигателя внутреннего сгорания, характеризующихся вращательно-поступательным движением деталей, необходима разработка специализированного измерительного комплекса. Существующие методы демонстрируют недостаточную эффективность, в связи с чем требуется создание новых датчиков и систем обработки сигналов для целей диагностики.

Библиографический список:

1. Подмастерьев, К. В. Состояние и инструментальное обеспечение электрических методов мониторинга узлов трения / К. В.

Подмастерьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 7. – С. 221-234. – EDN PYMOAJ.

2. Электрические измерения и способы обработки результатов наблюдения / В. С. Казачков, А. А. Кузнецов, С. И. Петров, В. Т. Черемисин. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2002. – 130 с. – EDN VCAHVX.

3. Рыжкин, А. А. Об электрических явлениях при трении / А. А. Рыжкин, В. Э. Бурлакова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 9(60). – С. 1564-1573. – EDN PBKGOD.

4. Зайцева, Н.А. Определение электродвижущей силы источника тока компенсационным методом: Учебное издание / Н.А. Зайцева, Ю.Г. Карпов, О.В. Михалева, Ф.А. Сидоренко. – Екатеринбург, 2025. – 12 с.

5. Салахутдинов, И. Р. К вопросу возникновения разности потенциалов в сопряжении «гильза цилиндров-поршневое кольцо» двигателя внутреннего сгорания / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, А. Л. Хохлов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 3(63). – С. 230-235. – DOI 10.18286/1816-4501-2023-3-230-235. – EDN PIYLYS.

6. Салахутдинов, И. Р. Теоретическое обоснование снижения износа уменьшением величины ЭДС в паре трения «поршневое кольцо - гильза цилиндров» / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, А. Л. Хохлов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 2(66). – С. 191-196. – DOI 10.18286/1816-4501-2024-2-191-196. – EDN VPSZWY.

ON THE QUESTION OF DETERMINING ELECTROMOTIVE FORCE BY THE COMPENSATION METHOD

Abdryashitov A.D., Salakhutdinov I.R.

FSBEI HE Ulyanovsk SAU

Glushchenko A.V.

FSBEI HE Ulyanovsk SU

Keywords: *circuit section, electromotive force, physical quantity, potential difference, potentiometer, conductor, contact.*

This paper examines a compensation method for determining EMF based on balancing the measured source EMF (E_x) with the voltage generated across a known resistance by current from an auxiliary source. This method is widely used to accurately measure the EMF of galvanic cells, batteries, and potentiometers for measuring low voltages. However, it has been established that its use for measuring EMF in internal combustion engines is unsuitable, particularly due to the rotating and reciprocating motion of the components.