



ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

С.З. Закиров, аспирант
e-mail: sarvar.zakirov@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Л.Ю. Волкова, канд. техн. наук, доцент,
зам. декана ФСЭ по учебной работе
e-mail: larisa.volkova@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

С помощью типовых устройств для исследования ДВС приведена методика расчета абсолютной и относительной погрешности при обработке результатов испытаний для двигателей внутреннего сгорания. Описан принцип работы тензометрического датчика S-образного типа и устройства автоматического измерения расхода топлива АИР-50 с примерами расчетов с помощью этих устройств. В качестве основных показателей в расчете использовались значения крутящего момента, частоты вращения коленчатого вала, удельного и часового расхода топлива и эффективной мощности двигателя. На основе расчета удельного эффективного расхода топлива определена относительная погрешность измерения. Например, при условии внедрения электронной системы управления подачей топлива снижение удельного эффективного расхода топлива не должно быть меньше величины относительной погрешности в процентах.

Ключевые слова: абсолютная и относительная погрешность, двигатель, крутящий момент, мощность, расход топлива

ВВЕДЕНИЕ

Оценка точности результатов эксперимента необходима, так как полученные результаты испытаний могут лежать в пределах возможной погрешности, а выводы окажутся ошибочными. Точность есть степень соответствия результатов измерений действительному значению величины. Понятие точности связано с понятием погрешности: чем выше точность, тем меньше погрешность измерений, и наоборот. Самые точные приборы могут определять действительное значение измеряемой величины с определенной погрешностью.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследованиях и совершенствовании эксплуатации ДВС необходимо должное внимание уделять топливной системе, а именно – расходу топлива. Удельный расход топлива зависит от следующих параметров: качество и сорт топлива, форма камеры сгорания, совершенство топливной аппаратуры, способ смесеобразования и сгорания топлива. Сравнивая топливные системы конца прошлого века и современные, можно сделать вывод, что удельный расход топлива удалось снизить на $g_e = 0,07-0,08$ кг/ (кВт · ч) в результате использования и создания новых эффективных сортов топлива, современных электронных систем подачи воздуха и топливной смеси.

Например, внедренная в ДВС система подачи топлива через многофазный его впрыск позволяет снизить удельный расход топлива g_e на 4 %, но в данном случае необходимо также ценить погрешность измерения. Если в результате внедрения вышеуказанной системы отно-

сительная погрешность измерения величины g_e (например, 4 %) будет равна снижению g_e тоже на 4 %, то положительное снижение g_e может быть не зафиксировано, так как полученные результаты находятся в пределах погрешности измерения.

Применяя современные приборы и стенды, для определения фактического значения g_e величина относительной погрешности измерения g_e не должна превышать $\pm 3,5\%$.

Главными параметрами двигателя внутреннего сгорания (ДВС) являются его номинальная эффективная мощность, крутящий момент, частота вращения коленчатого вала, удельный и часовой расход топлива на различных скоростных, нагрузочных режимах и токсичность отработавших газов.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью исследования является подбор оптимального оборудования и условий для определения абсолютной и относительной погрешностей измерения при обработке результатов испытаний двигателей внутреннего сгорания.

Для определения данных условий необходимо использовать формулы для нахождения погрешности величины крутящего момента, эффективной мощности двигателя, частоты вращения коленчатого вала, удельного и часового расхода топлива.

С помощью формул необходимо рассчитать основные параметры дизельного двигателя и произвести расчеты абсолютной и относительной погрешностей полученных результатов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера установим параметры двигателя, влияющие на погрешность при определении эффективного удельного расхода топлива g_e .

По величине g_e оценивают совершенство протекания рабочего процесса двигателя, индикаторные и эффективные показатели. Лучшие современные отечественные и зарубежные дизели с электронным управлением процесса подачи топлива и воздуха позволили снизить величину g_e до 0,18 кг/(кВт·ч).

Удельный расход топлива за один час в кг/(кВт·ч) определяют расчетным путем по формуле [1, 2]:

$$g_e = G_{\text{ч}} / N_e, \quad (1)$$

где $G_{\text{ч}}$ – часовой расход топлива, кг/ч (например, 17 кг/ч);

N_e – эффективная (снимаемая с коленчатого вала) мощность, кВт (например, 80 кВт).

Обычно в процессе испытания двигателя часовой расход топлива определяют объемным или весовым (массовым) способами. Расход топлива весовым способом можно определить, используя выражение:

$$G_{\text{ч}} = 3,6 \cdot \Delta G_{\text{T}} / t_{\text{T}}, \quad (2)$$

где ΔG_{T} – доза (навеска) топлива, г (например, 50 г);

t_{T} – время, в течение которого навеска топлива расходуется (сжигается) двигателем, с (например, 10 с).

Следует отметить, что цифра 3,6 получена в результате перевода г в кг (1 кг равен 1000 г), а 1 ч равен 3600 с. Значения ΔG_{T} и t_{T} оцениваются с определенной погрешностью, что будет влиять на величину g_e .

Мощность – работа, выполненная за единицу времени. При вращательном движении вала мощность двигателя (Вт) равна:

$$N_e = M_e \cdot \omega, \quad (3)$$

где M_e – эффективный крутящий момент на коленчатом валу двигателя, Н·м;
 ω – угловая скорость, рад. в с (1/с).

Согласно ГОСТ Р 53639 – 2009, погрешность измерения крутящего момента на валу отбора мощности не должна превышать $\pm 1,5\%$ [3].

По формуле (3) мощность определяется в Вт (Н · м /с). Чтобы результата получить в кВт, разделим правую часть на 1000:

$$N_e = M_e \cdot \omega / 1000 \quad (4)$$

Эффективный крутящий момент при испытаниях двигателя обычно определяют с использованием балансирующей электрической машины [4], которая является нагрузочным устройством (рис. 1).



Рисунок 1 – Балансирующая электрическая машина с весовым индикатором для определения крутящего момента

С помощью индикатора в формате весовой головки на нагрузочном устройстве можно определять крутящий момент двигателя. Используем следующие вводные данные: шкала индикаторной головки равна 1960 Н или 200 кгс при шкале деления 0,1 кгс, абсолютная погрешность $A_{абс} = \pm 0,05$ кгс ($\Delta_n(H) = 0,49$ Н), длина плеча тормоза $L_T = 1$ м. В результате исследований двигателя измеренная нагрузочная величина получилась 38,0 кг или 382 Н силы ($H_{изм}$). Крутящий момент составит 382 Н·м, так как длина плеча тормоза $L_T = 1$ м.

Относительная погрешность результата измерения равна [5, 6]:

$$\varepsilon_n(H_{изм}) = \frac{\Delta_n(H)}{H_{изм}} \cdot 100 = \frac{0,49}{382} \cdot 100 = 0,128\% \quad (5)$$

Величину крутящего момента M_e вычисляем по формуле:

$$M_e = P_T \cdot L_T, \quad (6)$$

где P_T – сила на индикаторе тормоза, Н;
 L_T – плечо тормоза, м.

В цифровом отсчетном устройстве индикаторное усилие тормоза, определенное весовой головкой в 1 кгс, будет равно 9,8 Н.

Для упрощения измерения силы на нагрузочном устройстве можно применять менее массивные и габаритные устройства, чем весовая головка. Например, малогабаритные сверхточные тензометрические датчики S-образного типа SBA-300 (рис. 2). Датчик устанавливается при помощи тяги между плечом тормоза балансирной машины и фундаментной плитой.

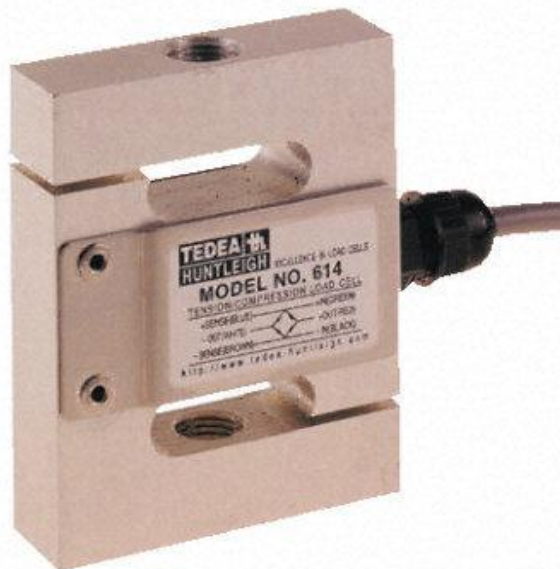


Рисунок 2 – Тензометрический датчик S-образного типа

Угловую скорость ω определяем следующим образом:

$$\omega = (2 \pi \cdot n) / 60 = (\pi \cdot n) / 30, \quad (7)$$

где n – частота вращения вала двигателя (об/мин, мин^{-1}).

Сократив численные значения из формул (4) и (7), получим следующее выражения для определения эффективной мощности:

$$N_e = (M_e \cdot n) / 9550 \text{ или } M_e = (9550 \cdot N_e) / n \quad (8)$$

Подставим значения в формулу (1) из выражений (2) и (8) и в итоге получим:

$$g_e = (9550 \cdot 3,6 \cdot \Delta G_T) / (t_T \cdot M_e \cdot n) \quad (9)$$

Например, для имеющихся значений:

$$g_e = (9550 \cdot 3,6 \cdot 50) / (10 \cdot 382 \cdot 2000) = 0,225 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

Исходя из выражения (9), можно сделать вывод, что погрешность эффективного расхода топлива будет зависеть от относительной и абсолютной погрешностей навески топлива, частоты вращения коленчатого вала, времени замера навески топлива, эффективного крутящего момента на коленчатом валу двигателя.

Для определения расхода топлива выбираем весы классом точности 0,1 ($K=0,1$) с диапазоном измерения массы до 100 г, так как погрешность измерений зависит от класса

точности и шкалы (номинальной/максимальной) используемого оборудования. Навеску топлива выбираем массой в 20 г.

Абсолютная погрешность измерения удельного расхода топлива равна:

$$\Delta_{\Pi}(m) = \frac{K \cdot m_{\text{НОМ}}}{100} = \frac{0,1 \cdot 100}{100} = 0,1 \text{ г} \quad (10)$$

Относительная погрешность:

$$\varepsilon_{\Pi}(m_{\text{ИЗМ}}) = \frac{\Delta_{\Pi}(m)}{m_{\text{ИЗМ}}} \cdot 100 = \frac{0,1}{20} \cdot 100 = 0,5\% \quad (11)$$

Величину N_e определяем по формуле (12) [6]:

$$N_e = \frac{P_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{120} = \frac{P_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30 \cdot m}, \quad (12)$$

где m – число тактов двигателя (для четырехтактного двигателя – 4, двухтактного – 2).

Исходя из выражения (9), можно сделать вывод, что величина N_e в кВт зависит от частоты вращения коленвала n , мин^{-1} , среднего эффективного давления в цилиндре P_e , МПа, при условии постоянного рабочего объема цилиндра V_h в литрах и числа цилиндров i . Для двигателей без наддува эффективное давление составляет $P_e = 0,7 - 1,0$ МПа, а с наддувом 1,1 – 3,0 МПа. Рабочий объем зависит от площади цилиндра (диаметра) и хода поршня.

Зная величину эффективной мощности N_e , по формуле (12) можно определить P_e и необходимое давление воздуха на впуске в цилиндры [7].

Давление воздуха на выходе из компрессора для четырехтактных двигателей определяется соотношением $P_k = (0,15 - 0,18)P_e$, для двухтактных двигателей $P_k = (0,2 - 0,28)P_e$.

Для измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя применяют тахометры. Чтобы провести замер частоты вращения вала, выбираем тахометр классом точности 0,1 ($K=0,1$). Шкала прибора рассчитана на номинальную частоту вращения $n=5000$ мин^{-1} (об/мин).

Определим **абсолютную погрешность** прибора:

$$\Delta_{\Pi}(n) = \frac{K \cdot n_{\text{НОМ}}}{100} = \frac{0,1 \cdot 5000}{100} = 5,0 \text{ об/мин} \quad (13)$$

Допустим, что данным тахометром мы измерили частоту вращения вала двигателя, равную 2000 мин^{-1} . Определим **относительную погрешность:**

$$\varepsilon_{\Pi}(n_{\text{ИЗМ}}) = \frac{\Delta_{\Pi}(n)}{n_{\text{ИЗМ}}} \cdot 100 = \frac{5}{2000} \cdot 100 = 0,25\% \quad (14)$$

Согласно ГОСТ Р 53639 – 2009, максимальная допустимая относительная погрешность частоты вращения при определении мощности двигателя не должна превышать $\pm 1,0\%$ [5].

Секундомеры можно применять для измерения расхода топлива. Они бывают двух типов: электрические и механические (рис. 3). Погрешность измерения зависит от конструкции исполнения секундомера, а также класс точности и градуировка. Очевидно, что у электронного секундомера погрешность измерений меньше, чем у механического секундомера.



а)



б)

Рисунок 3 – Виды секундомеров: а) механический; б) электронный

Представленный механический секундомер имеет минимальную шкалу деления 0,1 с; значение скачка секундной стрелки равно 0,1 с; класс точности секундомера равен 3. Определим предельную относительную погрешность при измерении времени $\varepsilon_{\Pi}(c_1)$:

$$\varepsilon_{\Pi}(c_1) = \pm K \cdot (1,7 \cdot A / T + B) = 3 \cdot (1,7 \cdot 0,1 / 20 + 4,3 \cdot 10^{-4}) = 0,26\% \quad (15)$$

где К – класс точности;

А – значение скачка секундной стрелки, с;

Т – измеряемое время, с;

В – составляющая относительной погрешности, определяющая отклонение частоты спускаемого регулятора, $4,3 \cdot 10^{-4}$.

Для автоматического измерения расхода топлива рассмотрим возможность применения установки АИР-50, представленной на рис. 4 [1, 4]. Главное ее назначение – измерять период времени, в течение которого происходит процесс горения (как в камере двигателя) мерной навески (дозы) топлива.

Мерная емкость для топлива 7 закреплена на весах 8. Емкость 7 наполняется или опустошается (в процессе горения топлива) в результате изменения положения электромагнитных клапанов в блоке 3. Электронный секундомер установлен в блоке управления 1, который управляет электромеханическим устройством 10. В свою очередь электромеханический блок 10 определяет массу груза 9. В момент, когда весы уравновешены, фотоэлектрический механизм (не показан на рисунке) фиксирует это положение. Блок управления 1 определяет время расходования топлива в мерной емкости при помощи электронного процессора, который обрабатывает полученную информацию. Провода 2 соединяют блоки расходомера.

Для повышения точности замера топлива установкой АИР-50 рекомендуется заменить электромагнитные клапаны блока 3 на быстродействующие с пьезоэлектрическим управлением.

Для определения погрешности расходования двигателем 50 г топлива используем в качестве средств измерения весы лабораторные (электронные) с пределом измерения 200 г, ценой деления 0,2 г и абсолютной инструментальной (приборной) погрешностью $\pm 0,1$ г.

Относительная погрешность равна:

$$\varepsilon_{\Pi}(m_{\text{изм}}) = \frac{\Delta_{\Pi}}{m_{\text{изм}}} \cdot 100 = \frac{0,1}{50} \cdot 100 = 0,2\% \quad (16)$$

Сравнивая погрешность расходования (сжигания) 20 г топлива (формула (11)) и 50 г (формула (16)), делаем вывод, что относительная погрешность уменьшилась с 0,5 до 0,2 %.

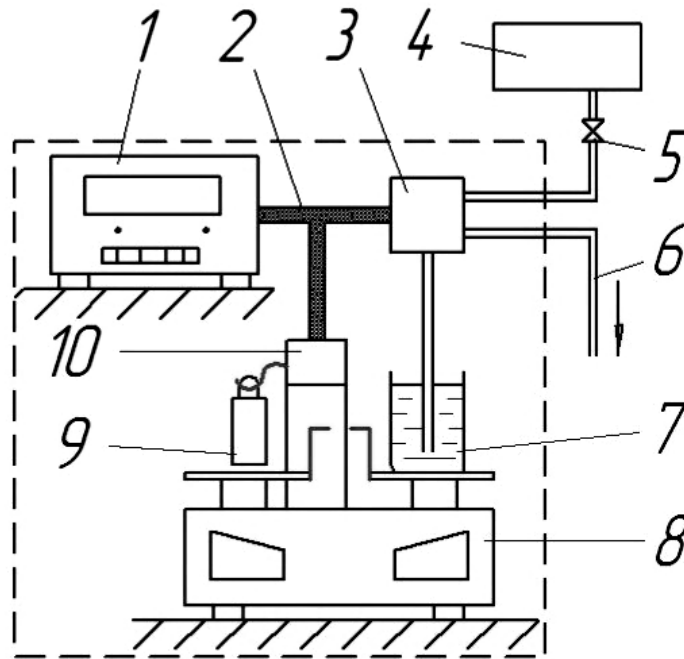


Рисунок 4 – Установка для измерения расхода топлива

Относительная предельная погрешность измерения и расчета удельного эффективного расхода топлива $\varepsilon_{\Pi}(g_e)$ равна сумме относительной погрешности всех измеряемых величин:

$$\begin{aligned} \pm \varepsilon_{\Pi}(g_e) &= [\varepsilon_{\Pi}(m_{\text{изм}}) + \varepsilon_{\Pi}(H_{\text{изм}}) + \varepsilon_{\Pi}(n_{\text{изм}}) + \varepsilon_{\Pi}(c_1)] = \\ &= (0,2 + 0,128 + 0,25 + 0,26) = \pm 0,838 \% \end{aligned}$$

Применительно к удельному расходу топлива ГОСТ Р 53639-2009 [6] и ГОСТ Р 52517-2005 [8] устанавливают допустимое значение относительной погрешности $\varepsilon_{\Pi}(g_e) = \pm 3,5\%$, а для часового расхода топлива $\pm 1,0\%$.

Стенды для обкатки, испытания и исследования ДВС, которые можно опционально оборудовать устройствами для анализа токсичности отработавших газов (оксида углерода, сажи, оксида азота), а также системой контроля расхода воздуха и давления газов внутри цилиндров двигателя изображены на рис. 5.

Определив массовые расходы воздуха и топлива, оценивают коэффициент избытка воздуха α по формуле [3]:

$$\alpha = M_{\text{в}} / (15,0 \cdot G_{\text{ч}}), \quad (17)$$

где $M_{\text{в}}$ – массовое количество воздуха, поступившее в цилиндры двигателя на данном режиме испытания, кг/ч;
 15,0 – теоретическое массовое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива;
 $G_{\text{ч}}$ – часовой расход топлива, кг/ч.

Для бензиновых двигателей $\alpha = 0,8-1,2$, дизелей – 1,4-6,0 (на номинальном режиме для дизеля $\alpha = 1,6-2,2$).

Например, для бензинового двигателя при $M_{\text{в}} = 150$ кг/ч, $G_{\text{ч}} = 10$ кг/ч величина $\alpha = 1$. Значение $M_{\text{в}}$ определяют при помощи счетчика расхода газа в м^3 (расходомером) и величины плотности воздуха. Пусть показание расходомера равно $140 \text{ м}^3/\text{ч}$, а плотность воздуха – $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$. Тогда массовое количество воздуха будет равно 168 кг/ч.

Плотность воздуха ρ можно определить по формуле:

$$P = \rho \cdot R \cdot T, \quad (18)$$

где P – абсолютное давление, Н/м²;
 R – газовая постоянная для воздуха 287 Дж/(кг·К);
 T – температура, К.

Для $P = 0,98 \cdot 10^5$ Па (атмосферное давление) и $T = 293$ К величина $\rho = 1,17$ кг/м³.

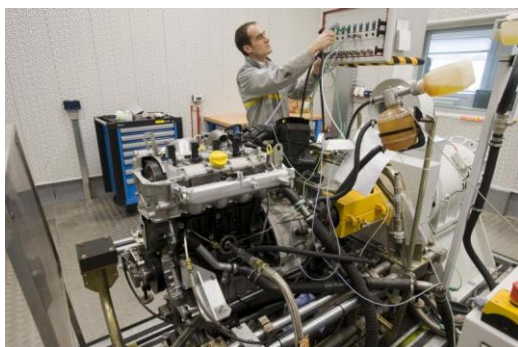


Рисунок 5 – Стенды для обкатки, испытания и исследования двигателей

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Чтобы повысить точность полученных результатов при испытаниях, исследований двигателей внутреннего сгорания следует уменьшать самые большие по величине погрешности измерений. Необходимо подбирать оборудование и условия для проведения испытаний, при которых погрешность будет минимальной, а точность сложных исследований/опытов – максимальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С помощью типовых устройств для исследования ДВС приведена методика расчета абсолютной и относительной погрешности при обработке результатов испытаний для двигателей внутреннего сгорания.
2. Представлены формулы для определения погрешностей основных параметров работы двигателя.
3. При условии внедрения электронной системы управления подачей топлива снижение удельного эффективного расхода топлива не должно быть меньше величины относительной погрешности в процентах.

4. Полученные данные при исследовании относительной и абсолютной погрешностей результатов измерения применимы для исследования диагностирования состояния топливной аппаратуры дизельного двигателя накладными датчиками давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макушев, Ю. П. Расчет систем и механизмов двигателей внутреннего сгорания математическими методами: учеб. пособие / Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова, Л. Ю. Михайлова, А. В. Филатов: учеб. пособие. – Омск: СибАДИ, 2011. – 284 с.
2. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов измерений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – Москва: Наука, главная редакция физ.-мат. литературы, 1970. – 104 с.
3. ГОСТ Р 53639 – 2009. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытания. – Введ. 2009 –15–12. – Москва: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2009. – 16 с.
4. Стефановский, Б. С. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б. С. Стефановский [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1972. – 368 с.
5. Газовая динамика и агрегаты наддува: методические указания к лабораторным работам по газовой динамике и агрегатам наддува для специальности 280440 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост. Рындин В.В., Макушев Ю.П. – Павлодар, 2007. – 63 с.
6. Макушев, Ю. П. Определение погрешности результатов испытания двигателей внутреннего сгорания / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова // Образование. Транспорт. Инновация. Строительство: сборник материалов II национальной научно-практической конференции, 18-19 апреля 2019 года. – Омск: СибАДИ, 2019. – С. 167-174.
7. Основы научных исследований и испытаний двигателей: практикум / Ю. П. Макушев, В. И. Подгурский, Л. Ю. Волкова. – Омск: СибАДИ, 2019. – 139 с.
8. ГОСТ Р 52517 – 2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Ч. 1. Стандартные исходные условия, объявление расхода топлива и смазочного масла. Методы испытаний. – Введ. 2005 –30–12. – Москва: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2004. – 30 с.

PROCESSING OF THE RESULTS TESTING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

S.Z. Zakirov, postgraduate student
e-mail: sarvar.zakirov@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

L.Yu. Volkova, PhD, Associate Professor
e-mail: larisa.volkova@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

Using standard devices for studying internal combustion engines, a methodology for calculating the absolute and relative error in processing test results for internal combustion engines is presented. The principle of operation of an S-type strain gauge sensor and an AIR-50 automatic fuel consumption measuring device with examples of calculations using these devices is described. As the main indicators in the calculation, we used the values of torque, crankshaft rotation, specific and hourly fuel consumption and effective engine power. Based on the calculation of the specific effective fuel consumption, the relative measurement error is determined. For example, subject to the introduction of an electronic fuel management system, the reduction in specific effective fuel consumption should not be less than the relative error in percent.

Key words: absolute and relative error, engine, torque, power, fuel consumption