

Научная статья

УДК 658.562.3

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27>

Нормирование погрешности косвенных измерений при приёмо-сдаточных испытаниях двигателей

Олег Альбертович Леонов¹, Нина Жоровна Шкаруба²✉

^{1, 2} Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия

¹oaleonov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

²shkaruba@rgau-msha.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения точности и достоверности результатов измерений контролируемых параметров двигателя при приёмо-сдаточных испытаниях. В ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний» установлены допускаемые погрешности основных контролируемых параметров двигателей при приёмо-сдаточных испытаниях, однако отсутствуют требования к допускаемой погрешности измерения мощности двигателя. На основании теории вероятностей выведена формула для расчёта погрешности измерения мощности и с учётом допускаемых погрешностей измерения (согласно ГОСТ 18509-88) рассчитаны допускаемые погрешности измерения мощности отремонтированных двигателей различных марок. Проведён сравнительный анализ рассчитанной допускаемой погрешности измерения мощности двигателей различных марок и реальной погрешности измерения мощности при обкатке на стендах КИ-5274, КИ-5540М, КИ-5541М, КИ-542М, КИ-2118А Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Российской академии сельскохозяйственных наук. Установлено, что погрешности измерения мощности превышают предельно допустимые значения. Для повышения достоверности результатов контроля мощности разработаны рекомендации по расчёту приёмочных границ со смещением относительно номинального значения мощности. Рассчитаны предельные погрешности измерения мощности двигателей различных марок и приёмо-сдаточные границы в зависимости от требуемой достоверности. Применение методики повысит достоверность результатов контроля на этапе приёмо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей.

Ключевые слова: погрешность измерений, приёмо-сдаточные испытания, косвенные измерения, качество измерений, допускаемая погрешность, предельная погрешность, нормирование допускаемой погрешности

Для цитирования: Леонов О. А., Шкаруба Н. Ж. Нормирование погрешности косвенных измерений при приёмо-сдаточных испытаниях двигателей // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 23–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27>

Regulation of the errors of indirect measurements of acceptance and acceptance tests of engines

Oleg A. Leonov¹, Nina Zh. Shkaruba²✉

^{1, 2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

¹oaleonov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>

²shkaruba@rgau-msha.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>

Abstract. In order to control the quality of assembly and adjustment of engines, acceptance tests have carried out. The conclusion about the quality of the repaired engine depends on the measurement information received during acceptance tests. Therefore, it is important to ensure the accuracy and reliability of the measurement results of the controlled engine parameters. Permissible errors of the main controlled parameters of engines during acceptance tests have set in GOST 18509-88 « Tractor and combine diesel engines. Methods of bench tests», but this document does not contain requirements for the permissible error in measuring engine power. Based on the probability theory, the formula for calculating the power measurement error has derived. Based on the derived formula and taking into account the permissible measurement errors (according to GOST 18509-88), the permissible measurement errors of power of repaired engines of various brands have calculated. A comparative analysis of the calculated value of the permissible error in measuring the power of engines of various brands and the actual error in measuring power during running-in on the stands KI-5274, KI-5540M, KI-5541M, KI-542M, KI-2118A GOSNITI. It had found that the power measurement errors exceed the maximum allowed. To increase the reliability of power control results, recommendations have been developed for calculating acceptance boundaries with an offset relative to the nominal power value. The maximum errors of power measurement of various engine brands and acceptance limits have calculated depending on the required reliability. Application of the method will increase the reliability of control results at the stage of acceptance tests of repaired engines.

Keywords: measurement error, acceptance tests, indirect measurements, quality of measurements, permissible error, maximum error, standardization of permissible error

Введение. Погрешность косвенно измеряемой величины зависит от многих факторов [1], наиболее существенные из них – функциональная зависимость между величиной, подлежащей косвенному определению, и непосредственно измеряемой величиной, а также погрешность средства измерений (СИ) [2, 3]. В некоторых случаях [4] для оценки погрешностей результатов косвенных измерений можно использовать известные и достаточно простые формулы для оценок абсолютной и относительной погрешностей без предварительной обработки результатов прямых измерений. В [5] доказано, что уменьшить погрешность косвенных измерений можно путём правильного выбора структурной схемы, пределов измерений и способов нормирования.

Приёмо-сдаточные испытания необходимы для контроля качества капитального ремонта двигателей. Контролируют следующие показатели: максимально и минимально устойчивую частоту вращения холостого хода; давление масла в главной масляной магистрали; мощность и расход топлива при номинальной частоте вращения и положении органов управления (рычага) регулятором, соответствующем полной подаче топлива. В ГОСТ 18509-88¹ регламентированы требования к допускаемой погрешности измерений контролируемых параметров двигателя, однако отсутствуют требования к погрешности измерения мощности. При нормировании допускаемой погрешности измерения мощности необходимо учитывать, что контролируемая величина – мощность двигателя – является косвенно измеряемой. От точности и достоверности полученной измерительной информации зависит заключение о качестве отремонтированного двигателя.

Косвенные измерения широко применяют при ремонте двигателей для контроля таких параметров, как масса, отклонение формы и расположения поверхностей [6, 7]. И в каждом случае возникает вопрос о нормировании допускаемой погрешности измерения и выборе СИ [8].

Цель исследования – определение формулы для расчёта погрешности измерения мощности и разработка рекомендаций для достижения заданной достоверности измерительной информации на этапе приёмо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей.

Косвенное измерение мощности. Для определения формулы для расчёта погрешности измерения мощности

Таблица 1

Основные контролируемые показатели двигателей разных марок при обкатке и испытании

Марка	$n_{\text{ном}}, \text{ мин}^{-1}$	$M_k, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$Ne, \text{ кВт, не менее}$
ЯМЗ 238НБ	1700	882	157
ЯМЗ 240НБ	1900	1111	221
СМД 60, 61, 68	2000	555	116
СМД 63, 68Д	2100	579	127

на этапе приёмо-сдаточных испытаний отремонтированного двигателя используем теорию вероятностей и математическую статистику. Измерение мощности относится к косвенным измерениям, т. е. для её нахождения требуются результаты измерения других величин, связанных с мощностью известной функциональной зависимостью. Результат косвенного измерения мощности двигателя (в киловаттах), а также погрешность измерения рассмотрим как случайные величины, связанные с измеряемыми значениями (крутящим моментом и частотой вращения) нелинейной функциональной зависимостью:

$$Ne = M_k n / 9550, \quad (1)$$

где M_k – крутящий момент; n – частота вращения.

В ГОСТ 18509-88 регламентированы погрешности $\pm 0,005 M_{k\text{макс}}, \pm 0,005 n_{\text{ном}}$ измерений контролируемых параметров – крутящего момента и частоты вращения соответственно. Погрешность измерения мощности в ГОСТ 18509-88 не нормирована, но её значение можно рассчитать, как погрешность косвенно измеряемой величины. Обработка результатов косвенных измерений существенно отличается от обработки результатов прямых измерений и проводится в соответствии с МИ 2083-90². Обработка результатов косвенных измерений при нелинейной зависимости аргументов основана на разложении в ряд Тейлора нелинейных функций, связывающих искомую величину с результатами прямых измерений других величин. Разложения в ряд Тейлора нелинейных функций имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при представлении результатов косвенных измерений [9]. Таким образом, погрешность результата косвенного измерения зависит от погрешности применяемых СИ крутящего момента и частоты вращения (см. формулу (1)). Погрешность этих СИ можно рассматривать как неисключённую систематическую погрешность с границами $\pm \Delta x_i$. Неисключённую систематическую погрешность результата косвенного измерения с доверительными границами $\pm \theta_p$ при нелинейной зависимости выразим как

$$\theta_p = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i^2}, \quad (2)$$

где k – поправочный коэффициент; $\partial f / \partial x_i$ – частная производная функции f от i -го аргумента; Δx_i – погрешность измерения i -го аргумента, входящего в уравнение связи с искомой величиной; m – количество аргументов входящих в уравнение связи с искомой величиной (в функцию f).

Для зависимости вида (1) погрешность измерения мощности определим по формуле

$$\Delta Ne = \sqrt{\left(\frac{\partial Ne}{\partial M_k}\right)^2 \Delta M_k^2 + \left(\frac{\partial Ne}{\partial n}\right)^2 \Delta n^2}. \quad (3)$$

¹ ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний».

² МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей».

Рассмотрим нормирование погрешности измерения приёмо-сдаточных испытаний на примере двигателей разных марок ЯМЗ (Ярославский моторный завод, Россия), СМД (Завод «Серп и молот», Россия), характеристики двигателей представлены в табл. 1.

Подставив в формулу (3) номинальные значения крутящего момента, частоты вращения из табл. 1 и их допускаемые погрешности измерения (согласно ГОСТ 18509-88), определим допускаемую погрешность измерения мощности отремонтированных двигателей (табл. 2).

Реальная погрешность измерения контролируемых параметров зависит от метрологических характеристик используемых обкаточно-тормозных стендов. Для обкатки и испытаний двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственного назначения применяются стенды КИ-5274, КИ-5540М, КИ-5541М, КИ-542М, КИ-2118А Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии). Эти стенды имеют следующие метрологические характеристики:

погрешность силоизмерительного механизма $\Delta P = \pm 0,5$ кг (или $\Delta M = \pm 3,5$ Н·м при длине рычага $l = 0,716$ м);

погрешность измерения частоты вращения ± 1 %.

С учётом формулы (3) и реальных метрологических характеристик получим рассчитанные значения предельной погрешности измерения мощности при обкатке двигателей на указанных выше стендах (см. табл. 2). Реальная погрешность измерения частоты вращения при использовании тахометра с погрешностью ± 1 % превышает вычисленную по ГОСТ 18509-88 предельно допустимую погрешность, как и погрешности измерения крутящего момента и мощности. Таким образом, предельные погрешности контролируемых параметров на стендах не удовлетворяют основному условию выбора СИ:

$$\pm \Delta_{\text{пр}} \leq \pm \varepsilon, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{пр}}$, ε – предельная погрешность СИ и допускаемая погрешность контролируемой величины соответственно.

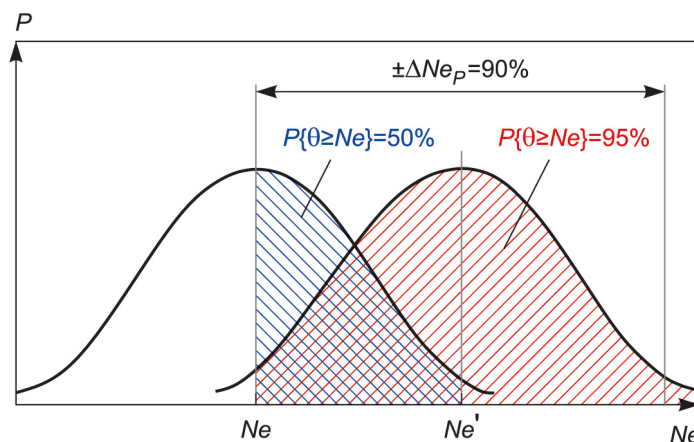
При невыполнении условия (4) необходимо повышать точность измерений параметров, контролируемых при прямых измерениях. Например, при измерении частоты вращения следует использовать тахометр с погрешностью не более $\pm 0,5$ %, поскольку согласно ГОСТ 18509-88 $\Delta_{\text{пр}} \leq \pm 0,005 n_{\text{ном}}$. Замена тахометра позволит уменьшить не только погрешность измерения частоты вращения, но и погрешность косвенного измерения мощности.

Ещё один способ повышения достоверности результатов контроля мощности – установление приёмочных границ со смещением. При приёмо-сдаточных испытаниях номинальную мощность контролируют по минимально допустимому значению. При отсутствии двухсторонних приёмочных границ и контроле по минимально допустимому значению мощности вероятность того, что действительная мощность испытываемого двигателя будет не меньше минимально допустимой, составит не более 50 %:

Таблица 2

Допускаемые и предельные погрешности измерения параметров при обкатке двигателей на стендах

Марка	$\Delta n_{\text{ном}}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\Delta Ne, \text{кВт}$
Допускаемая погрешность			
ЯМЗ 238НБ	$\pm 8,5$	$\pm 4,4$	$\pm 1,1$
ЯМЗ 240НБ	$\pm 9,5$	$\pm 5,6$	$\pm 1,6$
СМД 60, 61, 68	$\pm 10,0$	$\pm 2,8$	$\pm 0,8$
СМД 63, 68Д	$\pm 10,5$	$\pm 2,9$	$\pm 0,9$
Предельная погрешность			
ЯМЗ 238НБ	± 17	$\pm 3,5$	$\pm 1,7$
ЯМЗ 240НБ	± 17	$\pm 3,5$	$\pm 2,1$
СМД 60, 61, 68	± 17	$\pm 3,5$	$\pm 1,2$
СМД 63, 68Д	± 17	$\pm 3,5$	$\pm 1,3$



Влияние приёмочных границ при контроле мощности двигателя на достоверность результатов контроля в процессе приёмо-сдаточных испытаний

Influence of acceptance limits in power control on the reliability of the control results during acceptance tests

$P\{\theta \geq Ne\} = 50\%$ (рисунок). В соответствии с МИ 2083-90 при оценивании доверительных границ погрешностей результата косвенного измерения обычно принимают вероятность $P = 0,95$ или $0,99$. Чтобы обеспечить требуемую достоверность результатов косвенного измерения и гарантировать потребителю номинальную мощность, указанную в эксплуатационной документации, необходимо установить приёмочные границы для контроля мощности при обкатке и испытаниях.

Сдвиг при расчёте приёмочных границ будет зависеть от требуемой достоверности. Для того, чтобы обеспечить вероятность $P\{\theta \geq Ne\} = 95\%$ при контроле номинальной мощности, необходимо сдвинуть приёмочные границы в сторону увеличения мощности на $\Delta Ne_{P=0,90}$ (см. рисунок), в случае, когда требуется вероятность $P\{\theta \geq Ne\} = 99\%$, приёмочные границы необходимо сдвинуть в сторону увеличения мощности

Таблица 3

Предельная погрешность ΔNe_P и приёмочные границы Ne' измерения мощности двигателей различных марок

Марка двигателя	ΔNe_P , кВт		Ne' , кВт, не менее	
	0,90	0,98	0,95	0,99
ЯМЗ 238НБ	$\pm 1,6$	$\pm 2,45$	157,8	158,22
ЯМЗ 240НБ	$\pm 1,99$	$\pm 3,04$	222,0	222,52
СМД 60, 61, 68	$\pm 1,17$	$\pm 1,78$	116,58	116,89
СМД 63, 68Д	$\pm 1,22$	$\pm 1,87$	127,61	127,93

на величину $\Delta Ne_{P=0,98}$. Доверительный интервал ΔNe_P с учётом формул (2), (3) рассчитывается как

$$\Delta Ne_P = k \sqrt{\left(\frac{\partial Ne}{\partial M_k}\right)^2 \Delta M_k^2 + \left(\frac{\partial Ne}{\partial n}\right)^2 \Delta n^2}. \quad (5)$$

Для того, чтобы получить доверительный интервал $\pm \Delta Ne_{P=0,90}$, в формуле (5) примем поправочный коэффициент $k=0,95$, а при доверительной вероятности $P=0,98$ для $\pm \Delta Ne_{P=0,98} - k=1,44$ [10]. Таким образом, новое значение приёмочной границы Ne' (см. рисунок) найдём как

$$Ne' = Ne + \Delta Ne_P / 2. \quad (6)$$

Предельные значения погрешности измерения мощности при приёмо-сдаточных испытаниях, рассчитанные по формуле (5) и приёмочное значение границ мощности, найденное по формуле (6), для двигателей различных марок в зависимости от требуемой достоверности представлены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что сдвиг приёмочных границ при контроле мощности зависит от погрешности измерения и требуемой доверительной вероятности.

Закключение. Полученная формула для расчёта погрешности косвенного измерения мощности позволяет нормировать допускаемую погрешность с учётом требований ГОСТ 18509-88 и рассчитывать предельную погрешность измерения мощности двигателей различных типов на обкаточно-тормозных стендах. Сравнение полученных значений допускаемой и предельной погрешности измерения мощности для двигателей конкретного типа позволяет сделать заключение о соответствии точности и достоверности результатов измерений.

Для повышения достоверности результатов контроля на этапе приёмо-сдаточных испытаний отремонтированных двигателей рекомендовано контролировать мощность в зависимости от требуемой доверительной вероятности по приёмочным границам, смещённым относительно номинального значения мощности: при $P\{\theta \geq Ne\} = 95\%$ и $P\{\theta \geq Ne\} = 99\%$ сдвиги в сторону увеличения мощности на $\Delta Ne_{P=0,90}$ и $\Delta Ne_{P=0,98}$ соответственно.

Список источников

1. Прокопов А. В. Алгоритм обоснования уравнения измерения и оценки методической погрешности (неопределённости)

результата измерений при косвенных измерениях // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 25–29.

2. Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Косвенный метод измерения крутящего момента // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 7. С. 46–48.

3. Соболев В. И. Косвенные измерения при вероятностной зависимости между непосредственно измеряемыми и косвенно определяемыми величинами // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 17–20.

4. Еремин Е. В. Оценка погрешности результатов косвенных измерений некоторых величин // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 18–24.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-1-18-24>

5. Диденко В. И. Косвенные измерения при различном нормировании пределов допускаемых погрешностей технических средств // Метрология. 2017. № 4. С. 3–14.

<https://doi.org/10.32446/0132-4713.2017-4-3-14>

6. Leonov O. A., Shkaruba N. Z., Vergazova Y. G., et al., *Russian Engineering Research*, 2020. vol. 40, no. 9. pp. 726–731.

7. Shkaruba N. Z., Leonov O. A., *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 3, pp. 211–214.

<https://doi.org/10.3103/S1068798X21030175>

8. Shkaruba N. Zh., Leonov O. A., Grinchenko L. A., *Journal of Physics: Conference Series. II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*, 2021, 42039.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042039>

9. Еремин Е. В. О корректности представления значений величин и показателей точности результатов косвенных измерений // Приборы. 2019. № 9. С. 46–54.

10. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.

References

1. Prokopov A. V., *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, pp. 346–351. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0147-4>

2. Zaikin S. F., Perminov B. A., Indirect method of measurement of a twisting moment, *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2011, no. 7, pp. 46–48. (In Russ.)

3. Sobolev V. I., *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, no. 7. pp. 652–656.

<https://doi.org/10.1007/s11018-006-0164-y>

4. Eremin E. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 15–22.

<https://doi.org/10.1007/s11018-020-01743-x>

5. Didenko V. I., Indirect measurements at different specification of maximum permissible errors of technical means, *Metrologia*, 2017, no. 4. pp. 3–14. (In Russ.)

<https://doi.org/10.32446/0132-4713.2017-4-3-14>

6. Erokhin M. N., Leonov O. A., Shkaruba N. Zh., Golitskiy P. V., Antonova U. Yu., *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 40, no. 9, pp. 726–731.

<https://doi.org/10.3103/S1068798X20090105>

7. Shkaruba N. Z., Leonov O. A., *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 3, pp. 211–214.

<https://doi.org/10.3103/S1068798X21030175>

8. Shkaruba N. Zh., Leonov O. A., Grinchenko L. A., *Journal of Physics: Conference Series. II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*, 2021, 42039.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042039>

9. Eremin E. V., On the correctness of the representation of the values of quantities and indicators of the accuracy of the results of indirect measurements, *Instruments*, 2019, no. 9, pp. 46–54. (In Russ.)

10. Selivanov M. N., Fridman A. E., Kudryashova Zh. F., *Kachestvo izmerenij: Metrologicheskaya spravochная kniga [Measurement quality: Metrological reference book]*, Leningrad, Lenizdat Publ., 1987, 295 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.02.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 18.05.2022.
The article was submitted 14.02.2022; approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 18.05.2022.