

УДК 004.021:621.11

А.Ю. Будко, М.Ю. Медведев

**МЕТОД ОЦЕНКИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ
ПО СИГНАЛУ ИОННОГО ТОКА***

Предложен метод оценки неравномерности работы двигателя по сигналу ионного тока. Для оценки неравномерности производится комплексный анализ параметров сигнала ионного тока, регистрируемого во всех рабочих цилиндрах двигателя. Метод позволяет производить расчет степени неравномерности вращения коленчатого вала, оценивать среднестатистическую работу газов для каждого из цилиндров двигателя, оценивать наполнение цилиндров и цикловую топливоподачу. Для реализации метода сигнал ионного тока аппроксимируется тригонометрическим рядом Фурье. Степень неравномерности вращения коленчатого вала рассчитывается по периоду между гармониками аппроксимирующей кривой, соответствующей сигналу ионного тока различных цилиндров. Работа газов оценивается как интегральное значение аппроксимирующей сигнал модельной кривой. Анализ полученных при расчете результатов позволяет производить оптимизацию двигателя в целях улучшения его эксплуатационных показателей. Приведены примеры оценки предложенным методом параметров ДВС по экспериментальным данным. Приведен пример оптимизации ДВС, подтверждающий практическую значимость метода.

Ионный ток; неравномерность работы; оптимизация.

A.Yu. Budko, M.Yu. Medvedev

**METHOD FOR ESTIMATING IRREGULAR ENGINE OPERATION
ON AN ION CURRENT SIGNAL**

A method for estimating irregular of the engine on an ion current signal . To assess the irregular produced a comprehensive analysis of the signal parameters of the ion current detected in all the working cylinders of the engine. Method allows to calculate the degree of unevenness of rotation of the crankshaft , to evaluate the work for each of the cylinders of the engine , to evaluate filling of cylinders and cycle the fuel supply . To realize the ion current signal is approximated by a trigonometric Fourier series. The degree of irregularity of the crankshaft is calculated on an period between the harmonics approximating curve corresponding to the ion current signal different cylinders. Job gas is estimated as the integral value of the signal approximating model curve . Analysis of the results of the calculation allows engine optimization in order to improve its operational performance . The examples of the proposed method estimates ICE parameters from experimental data . An example of the optimization engine , confirming the practical value of the method .

Ion current; irregularity operation; optimization.

Введение. Широчайшее распространение двигателей внутреннего сгорания (далее ДВС) делает актуальными исследования, направленные на улучшение его эксплуатационных показателей. Методы оценки неравномерности работы цилиндров двигателя позволяют производить техническую диагностику двигателей и оптимизацию работу ДВС в целях повышения его КПД.

Большинство известных на сегодняшний день методов оценки неравномерности основаны на: анализе характера колебаний двигателя на подвесе [1, 2]; анализе неравномерности вращения коленчатого вала [3, 4]; анализе виброускорений различных деталей – ДВС [1, 2, 4]. В тоже время в недостаточной мере развиты методы, основанные на оценке неравномерности работы двигателя по сигналу ионного тока.

* Работа выполнена при поддержке: РФФИ, грант № 13-08-00315; грант Президента РФ МД-1098.2013.10; гранта НШ-3437.2014.10.

Известно, что оценка работы цикла двигателя внутреннего сгорания может быть произведена по параметрам сигнала ионного тока, в частности выявлена взаимосвязь работы цикла, определенной с помощью индикаторной диаграммы, и амплитудного значения тока в цепи ионизационного зонда [5].

В данной работе описан метод, позволяющий оценивать неравномерность работы двигателя и производить его оптимизацию. Метод основан на комплексном анализе параметров сигнала ионного тока, таких как средние площади под кривыми сигнала и периоды между сигналами для каждого из цилиндров.

Разработанный метод состоит из следующих этапов:

1. Получение выборок сигнала ионного тока на установившихся режимах двигателя для всех рабочих цилиндров.
2. Предварительная обработка (фильтрация) выборок.
3. Анализ данных, выбор математической модели аппроксимации сигнала и ее параметров.
4. Аппроксимация данных.
5. Анализ полученных при аппроксимации данных.
6. Анализ причин неоптимальной работы ДВС.
7. Процедура оптимизации работы ДВС.

На первом этапе производится запись сигнала ионного тока во всех цилиндрах двигателя. Запись должна производиться на стационарных режимах при неизменных управляющих воздействиях и условиях окружающей среды. Записанные данные образуют статистические выборки, которые подлежат дальнейшему анализу. В результате записи получается набор осциллограмм, в котором осциллограммы ионного тока каждого из цилиндров чередуются в определённой последовательности в соответствии с порядком работы цилиндров конкретного исследуемого ДВС.

На рис. 1 приведен пример парада осциллограмм, регистрируемых в четырехцилиндровом, четырехтактном двигателе. Порядок работы цилиндров: 1–3–4–2.

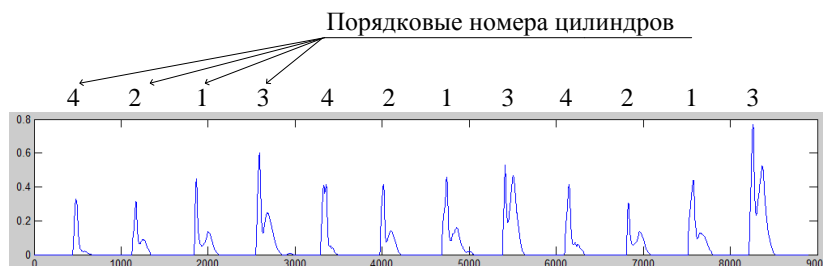


Рис. 1. Парад осциллограмм ионного тока четырехцилиндрового четырехтактного двигателя

Анализ парада осциллограмм позволяет сделать вывод о неравномерности в работе двигателя, которая имеет периодический характер. Так, площади под осциллограммами ионного тока четвертого цилиндра значительно меньше площадей под осциллограммами третьего цилиндра, что позволяет сделать заключение о значительной разнице в производимой газами работы в данных цилиндрах.

Для дальнейшей работы с записанными выборками сигнал необходимо отфильтровать для удаления высокочастотных компонент и шумов. Эта процедура позволяет в дальнейшем получить лучшее качество аппроксимации. Фильтрация производится цифровым фильтром низких частот, при этом порядок фильтра определяется исследователем в зависимости от качества конкретного записанного сигнала.

Порядок аппроксимации данных следующий. На первом этапе производится выбор математической модели исходя из следующих начальных данных: число рабочих цилиндров, характер наблюдаемой неравномерности. Так, для четырёхцилиндрового двигателя, работающего на установившемся режиме, сигнал имеет периодический характер с периодом, равным времени между рабочими тактами. В этом случае возможна аппроксимация сигнала тригонометрическим рядом Фурье [6], описываемом выражением(1):

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(nwt) + b_i \sin(nwt), \quad (1)$$

где a_0 – общий член, получаемый при $w=0$, a_i и b_i – амплитуды гармоник, w – основная частота сигнала, зависящая от частоты вращения коленчатого вала, n – число гармоник сигнала, выбираемое исходя из числа цилиндров и степени неравномерности работы ДВС.

Для выбранной параметрической модели производится процедура оценки ее коэффициентов. Вычисление коэффициентов модели, дающих наименьшую погрешность при аппроксимации, может быть произведено по методу наименьших квадратов [7].

После выбора математической модели и ее параметров производится аппроксимация статистических выборок записанного сигнала.

Пример аппроксимации регистрируемого сигнала ионного тока выражением (1) при $n=4$ приведен на рис. 2. Аппроксимация произведена для 125 циклов срабатывания всех четырех цилиндров ДВС. Режимные параметры работы: нагрузка – 25 % номинальной нагрузки двигателя, частота вращения коленчатого вала – 1875 об/мин⁻¹, управляющие воздействия неизменны.

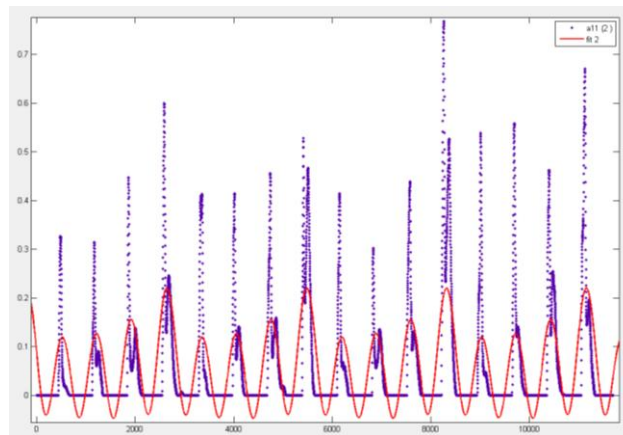


Рис. 2. Пример аппроксимации регистрируемого сигнала ионного тока

Для проверки адекватности модели и возможности ее применения для оценки произведенной цилиндрами работы производится расчет разброса абсолютной погрешности фактической и оцененной площадей под кривыми ионного тока и модельными кривыми, полученными при аппроксимации. Расчет разброса абсолютной погрешности фактической и оцененной площадей ΔP для выборки сигнала длиной $[0; k]$ производится по выражению (2):

$$\Delta P = \sqrt{\frac{(\int_0^k S_{ИТ}(t)dt - \int_0^k y(t)dt)^2}{k}}, \quad (2)$$

где $S_{ИТ}$ – истинные значения сигнала ионного тока, k – количество отсчетов сигнала.

Далее производится расчет разброса относительной погрешности оценки площадей под экспериментальной и модельными кривыми по выражению (3):

$$\delta_P = \frac{\Delta P}{\int_0^k S_{ИТ}(t) dt} \cdot 100 \% . \quad (3)$$

Пример результата расчета δ_P для рассматриваемой выборки приведен на рис. 3.

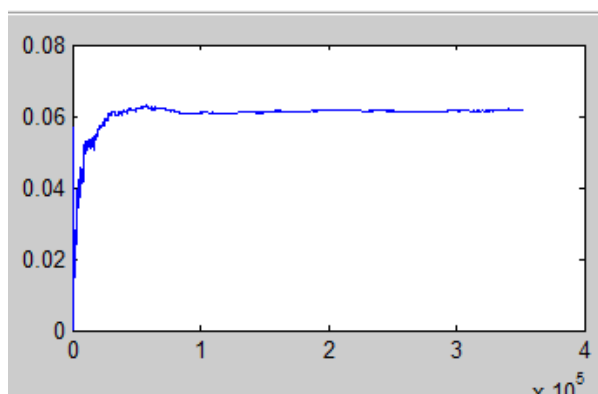


Рис. 3. Характер изменения относительной погрешности оцененной производимой цилиндрами ДВС работы

Характер изменения δ_P позволяет сделать вывод о допустимости выбранной математической модели для аппроксимации сигнала ионного в рассматриваемом случае.

Непостоянство угловой скорости вращения коленчатого вала принято оценивать по степени неравномерности вращения δ [8] в соответствии с выражением (4):

$$\delta = \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})}{\omega_{cp}}, \quad (4)$$

где ω_{max} и ω_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения угловой скорости вала двигателя в течение рабочего цикла; ω_{cp} – среднее значение угловой скорости вала;

$$\omega_{cp} = \frac{(\omega_{max} + \omega_{min})}{2}. \quad (5)$$

Максимальная допустимая степень неравномерности вращения вала должна обеспечивать устойчивость работы двигателя на всех предусмотренных режимах и надёжность пуска двигателя, а также удовлетворять требованиям приемника энергии.

Большая степень неравномерности вращения может повлечь за собой снижение минимальной угловой скорости до нуля; при этом двигатель останавливается. Чем меньше отношение δ , тем выше равномерность вращения вала, тем благоприятнее условия работы двигателя [8, 9].

Для нахождения значений угловых скоростей ω_i , соответствующих ускорениям, придаваемым коленчатому валу в результате работ L_i каждого из цилиндра двигателя, определяется средний период T_i следования сигналов ионного тока этих цилиндров как время между глобальными максимумами функции (1) в соответствии с рис. 3. После определения T_i угловые скорости ω_i рассчитываются в соответствии с выражением (7):

$$\omega_i = \frac{\varphi}{T_i}, \quad (6)$$

где φ – угол поворота коленчатого вала между рабочими тактами, для рассмотренного случая $\varphi = 180^\circ$.

После расчета ω_i производится выбор ω_{max} и ω_{min} и определяются степени неравномерности вращения δ в соответствии с выражением (4).

Для рассмотренного случая рассчитанная степень неравномерности вращения δ составила 0,02, что находится на границе допустимых значений 0,01...0,02 для автомобильных двигателей [8, 9].

Для расчета среднестатистической работы газов в каждом цилиндре двигателя производится интегрирование полученной в результате аппроксимации функции, пример результатов расчета представлен на рис. 4.

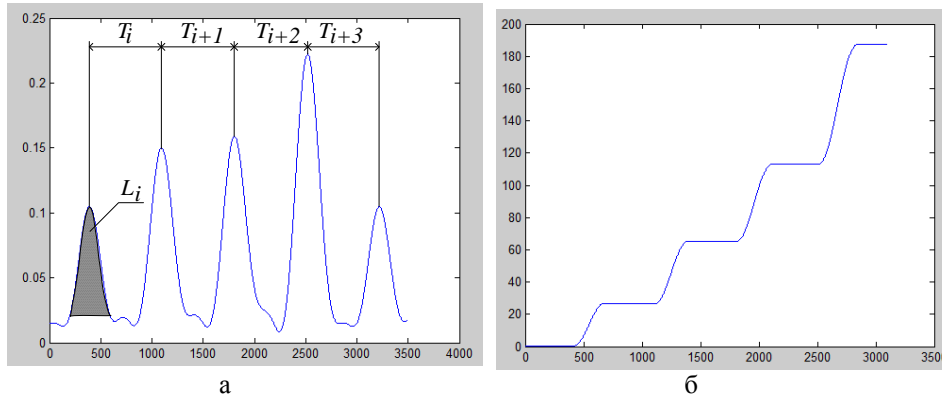


Рис. 4. Графики функций: а – аппроксимирующего выражения; б – его интегрального значения без учета высших гармоник: T_i – период, L_i – оцененная работа газов

Тогда работа газов каждого из цилиндров определяется как интегральное значение соответствующего ему пика модельной кривой.

Численные значения оцененной работы газов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения оцененной работы газов

Порядковый номер цилиндра	Оцененная работа
4	26,913
2	38,683
1	48,054
3	72,466

Коэффициент эффективности работы каждого цилиндра k_i по критерию неравномерности производимой работы вычисляется в соответствии с выражением (7):

$$k_i = L_i / L_{max}, \quad (7)$$

где L_i – оцененная работа i -го цилиндра, L_{max} – работа цилиндра, производящего максимальную работу.

Результаты расчета k_i сведены в табл. 3.

Таблица 3

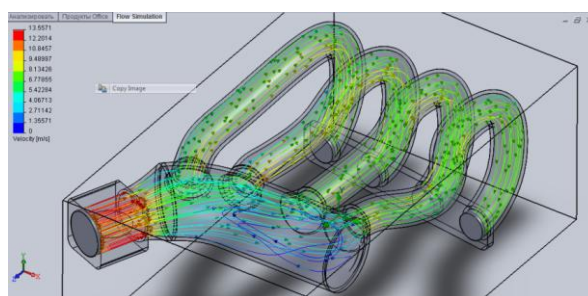
Коэффициент эффективности работы цилиндров двигателя

Порядковый номер цилиндра	k_i
1	0,659
2	0,534
3	1
4	0,371

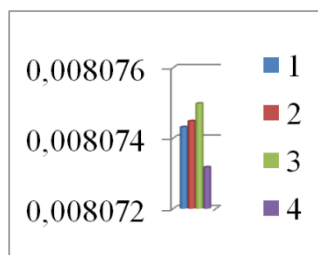
Анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод о значительной неравномерности работы, производимой цилиндрами испытуемого двигателя. Так, четвертый цилиндр производит в 2,7 раза меньшую работу, чем третий, что говорит о необходимости оптимизации его работы.

Неоптимальная работа четвертого цилиндра может быть вызвана худшими условиями его наполнения [10], поскольку все прочие параметры равны для всех цилиндров.

Для проверки предположения о причине неоптимальной работы четвертого цилиндра производится расчет массового расхода воздуха по раннерам для впускного коллектора испытуемого двигателя и сравнивается с данными, полученными в результате анализа сигнала ионного тока. Результаты расчета впускного тракта представлены на рис. 5 в программе SolidWorks.



а



б

Рис. 5. Моделирование работы впускного коллектора: а – модель впускного коллектора в программе SolidWorks; б – диаграмма рассчитанного массового расхода воздуха по раннерам для заданного режима работы двигателя

Сопоставление данных газодинамического расчета, представленных на рис. 5,б, с данными анализа ионного тока, представленными на рис. 6, указывает на верность определенной причины пониженной эффективности работы 4-го цилиндра.

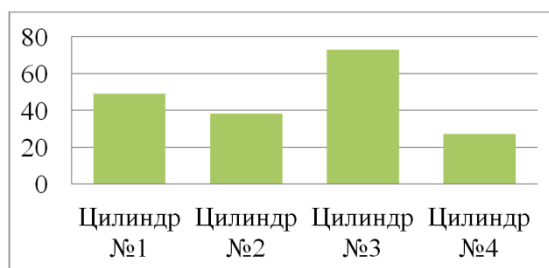
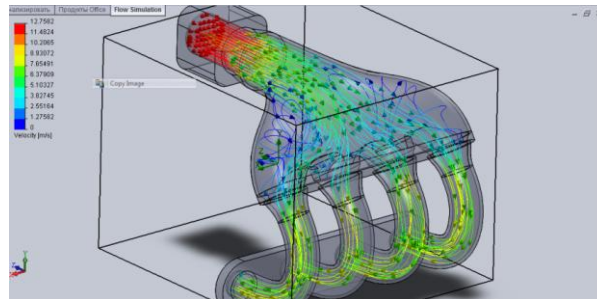
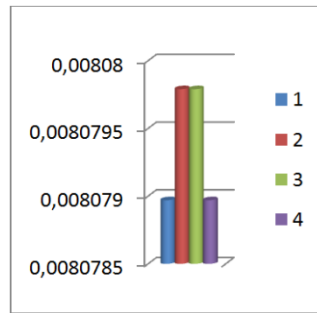


Рис. 6. Диаграмма оцененной по ионному току работы цилиндров

После определения причины пониженной эффективности работы принимаются меры к ее устранению. На рис. 7 представлен газодинамический расчет впускного коллектора более оптимальной формы.



а



б

Рис. 7. Моделирование работы впускного коллектора оптимальной формы: а – модель впускного коллектора в программе SolidWorks; б – диаграмма рассчитанного массового расхода воздуха по раннерам для заданного режима работы двигателя

После устранения причины неоптимальной работы производится замер мощностных показателей ДВС. На рис. 8 приведен результат замера мощностных показателей двигателя до и после процедуры оптимизации.

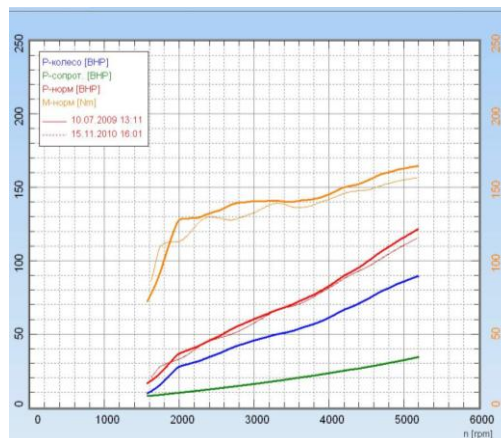


Рис. 8. Результат замера мощностных показателей двигателя: до (тонкие линии) и после (толстые линии) процедуры оптимизации

На рис. 8 верхний график соответствует развиваемому крутящему моменту, нижний – мощности двигателя.

Прирост показателей составил в среднем 1–13 % в исследованном диапазоне оборотов коленчатого вала.

Вывод. В статье представлен метод, позволяющий производить расчет параметров неравномерности работы двигателя. В результате расчета для исследуемого двигателя выявлена значительная неравномерность вращения коленчатого вала и разница в производимой газами работе для различных цилиндров. В результате процедуры оптимизации степень неравномерности вращения коленчатого вала снижена на 25 %, получена прибавка мощности в диапазоне 2000–2900 об/мин порядка 6 лошадиных сил и крутящего момента – IS 11/м, а в диапазоне 3100–5100 об/мин около 10 лошадиных сил и крутящего момента – 12 Н/м

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галевко В.В., Гриб В.В., Шатров М.Г.* Виброакустический контроль технического состояния ДВС и агрегатов автомобиля // Сб. трудов МАДИ (ГТУ). – М.: Эксподизайн, 2007. – С. 287-289.
2. *Кошкин В.Е., Луканин В.Н., Тольский В.Е.* Методы измерения и экспериментального исследования шума и вибраций автомобильных двигателей. – М.: НАМИ, 1961. – С. 15.
3. *Покусаев М.Н., Сибряев К.О., Шевченко А.В.* Экспериментальное определение степени неравномерности вращения валомашинно-двигательного комплекса судна пр. 1557 // Вестник АГТУ. – 2008. – № 2 (43). – С. 140-144.
4. Патент РФ № 2010110860/07, 22.03.2010 // Пшихопов В.Х. Система зажигания двигателя // Патент России № 2446309. – 2012.
5. *Ивашин П.В., Рамазанов М.П., Твердохлебов А.Я., Шайкин А.П.* О возможности оценки работы цикла двигателя внутреннего сгорания ионизационным зондом // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 4 (22). – С. 165-168.
6. Патент РФ № 5064974/06, 27.01.1996 // Прыгунов А.И. Способ оценки неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания // Патент России № 2053491. – 1996.
7. *Жук В.В., Натансон Г.И.* Тригонометрические ряды Фурье и элементы теории аппроксимации. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 188 с.
8. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд. – М., 1962. – С. 15-50.
9. *Вырубов Д.Н., Ефимов С.И., Иващенко Н.А. и др.* Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. Орлина А.С., Круглова М.Г. – М.: Машиностроение, 1984. – 374 с.
10. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие // Под ред. д-ра техн. наук проф. Григорьева Н.В. – Л.: Машиностроение, 1974. – 434 с.
11. *Тихонов Р.А.* Исследование и оптимизация скорости воздушных потоков в газовых трактах двигателей внутреннего сгорания // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 194-199.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Павленко.

Медведев Михаил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: medvmihal@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Будко Артем Юрьевич – e-mail: artem_budko@mail.ru; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Medvedev Mikhail Yur'evich – Southern Federal University; e-mail: medvmihal@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Budko Artem Yur'evich – e-mail: aptem_budko@mail.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; postgraduate student.