

## Альтернативный эталонный цикл двигателя внутреннего сгорания

# 08, август 2012

DOI: [10.7463/0812.0475919](https://doi.org/10.7463/0812.0475919)

Самойленко А. Ю.

УДК 621.431.74

Россия, Новороссийск, ФГБОУ ВПО "Государственный морской университет  
имени адмирала Ф.Ф. Ушакова"  
[say-nvrsk@yandex.ru](mailto:say-nvrsk@yandex.ru)

### Введение

Известные методы теоретического и практического анализа и синтеза циклов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) базируются исключительно на термодинамических представлениях о цикле. Этим методам посвящено огромное число работ теоретического и практического характера, перечислить которые в рамках статьи не представляется возможным. Достаточно указать на ставшую классической в данной области работу отечественных ученых [1].

Как известно, в теории тепловых двигателей в качестве термодинамического эталона рассматривается цикл Карно. Менее известен в этом качестве регенеративный цикл, например, цикл Стирлинга [2]. В тоже время, когда речь идет о цикле ДВС, и, в частности, о судовых дизелях, эти эталоны практически не рассматриваются, поскольку они весьма далеки по составу и характеру процессов от реального цикла ДВС. В практических расчетах и теоретических исследованиях анализ циклов ДВС ограничен, как правило, вариациями от цикла с изохорным, до цикла с изобарным подводом тепла и их комбинацией, что подробно рассмотрено в той же работе [1] или, например, в работе [3].

Кроме этого, в поршневом двигателе с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) процессы изменения объема цилиндра и давления газов протекают не ступенчато, а плавно

в функции угла  $\varphi$  поворота коленчатого вала (ПКВ) двигателя. В итоге это существенно изменяет вид реальных циклов, по сравнению с рассматриваемыми в теории.

В данной работе сделана попытка устранить эти противоречия и предложить цикл, который мог бы использоваться в качестве эталонного цикла ДВС, как альтернативы известным эталонам. Дальнейшее изложение материала статьи базируется на данных, полученных автором на дизелях морских судов. Однако никаких принципиальных ограничений по применению полученных результатов к другим разновидностям ДВС, с традиционной конструкцией КШМ, автор не усматривает.

### Метод исследования

Для решения этой задачи, в отличие от традиционных методов, цикл дизеля анализируется автором не в функции объема, а в функции угла ПКВ, с использованием методов гармонического анализа. При рассмотрении цикла двигателя в функции угла ПКВ, как периодически повторяющегося процесса, его развернутая индикаторная диаграмма  $p(\varphi)$  представлена суммой гармоник  $k$  с амплитудами  $P_{i \max}$  начальными фазами  $\varphi_i$ , отсчитываемыми относительно положения верхней мертвой точки, и некоторой постоянной составляющей  $p_0$

$$p(\varphi) = p_0 + \sum_{i=1}^k P_{i \max} \cos(i\varphi + \varphi_i), \quad (1)$$

где  $i=1, 2, 3, \dots$  - номер гармоники. Частота первой гармоники равна частоте вращения коленчатого вала двигателя.

В качестве примера на рис. 1 представлена развернутая индикаторная диаграмма судового высокооборотного дизеля 4L20, с частотой вращения 900 1/мин, а также компоненты ее разложения на гармоники в соответствии с выражением (1).

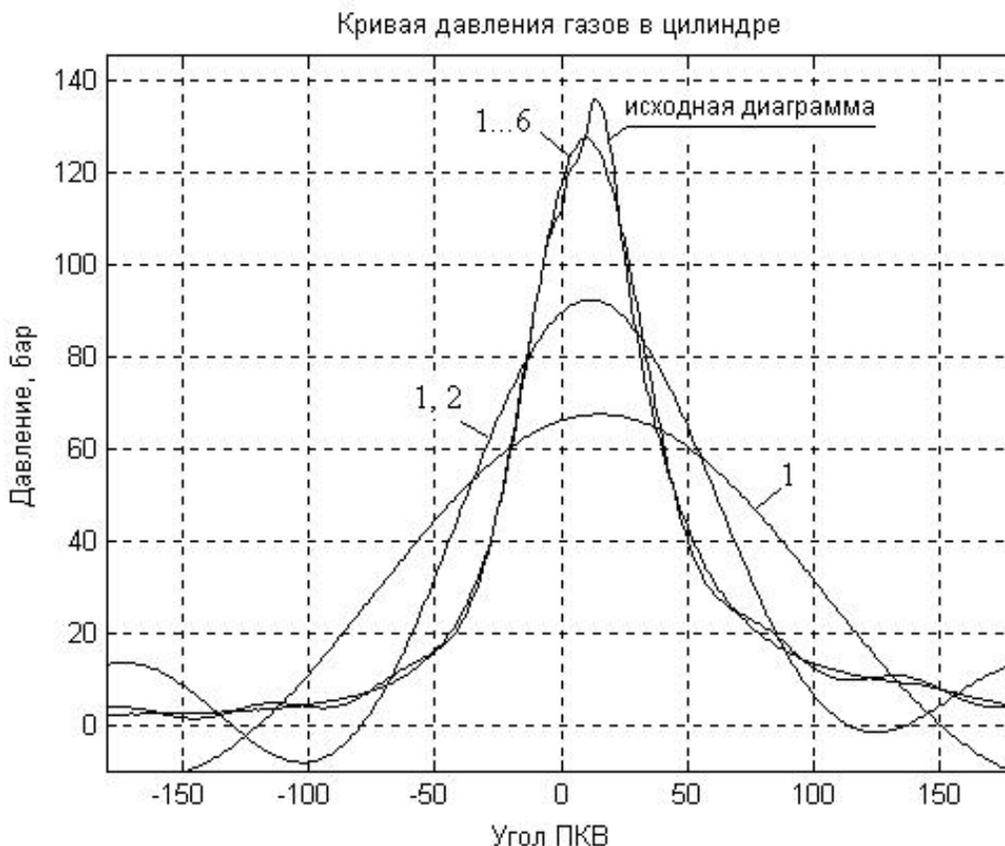


Рис. 1 Исходная индикаторная диаграмма и ее компоненты разложения: 1- первая гармоника; 1, 2 – сумма первых двух гармоник; 1...6 - сумма первых 6 гармоник

### Роль гармоник в индикаторной диаграмме

При таком представлении развиваемое в цикле дизеля среднее индикаторное давление  $p_{mi}$ , как показано автором в работе [4], определяется выражением

$$p_{mi} = \frac{\pi}{2} \left( P_{1\max} \sin \varphi_1 + \frac{\lambda}{2} P_{2\max} \sin \varphi_2 \right), \quad (2)$$

где  $P_{1\max}$  и  $\varphi_1$  – амплитуда и начальная фаза первой гармоники;

$P_{2\max}$  и  $\varphi_2$  – амплитуда и начальная фаза второй гармоники;

$\lambda$ - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна двигателя, характеризующее КШМ.

Из выражения (2) следует, что среднее индикаторное давление, то есть полезный эффект от работы двигателя, создается только первыми двумя гармониками. В работе [5]

автором данной статьи доказано, что кроме первой гармоники в  $p_{mi}$  теоретически вносят вклад все четные гармоники. Однако, начиная с 4-й гармоники их суммарный вклад незначителен, не превышает 1 %, и его можно не учитывать.

Из выражения (2) напрашивается естественный вывод - поскольку гармоники, начиная с третьей, с позиции получения  $p_{mi}$  бесполезны, то цикл дизеля целесообразно организовать так, чтобы он содержал только первые две гармоники.

Третья и более высокие гармоники не просто бесполезны с точки зрения выработки  $p_{mi}$ , но и в определенной степени вредны. Так, одним из основных параметров механической напряженности судового дизеля является максимальное давление его цикла  $P_{max}$ . По данному параметру конструкции современных судовых дизелей приблизились к пределу прочности применяемых конструкционных материалов. Это является сдерживающим фактором на пути дальнейшего форсирования дизелей, в частности – повышения развиваемого в цилиндре среднего индикаторного давления  $p_{mi}$ . Третья и более высокие гармоники не дающие вклада в среднее индикаторное давление, тем не менее, вносят существенный вклад в максимальное давление. Это наглядно видно на рис. 1, где максимальное давление суммы первых двух гармоник составляет примерно 92 бара, а для суммы первых шести гармоник оно возрастает уже до 128 бар.

### **Цикл ДВС из двух гармоник**

Исходя из вышеизложенного, на рис. 2 приведено сравнение двух индикаторных диаграмм судового малооборотного дизеля (МОД) – исходной, полученной на реальном двигателе, и синтезированной из ее двух первых гармоник. Для упрощения реализации синтезированной диаграммы, по сравнению с диаграммой, показанной на рис. 1 обнулена в своих окончаниях.

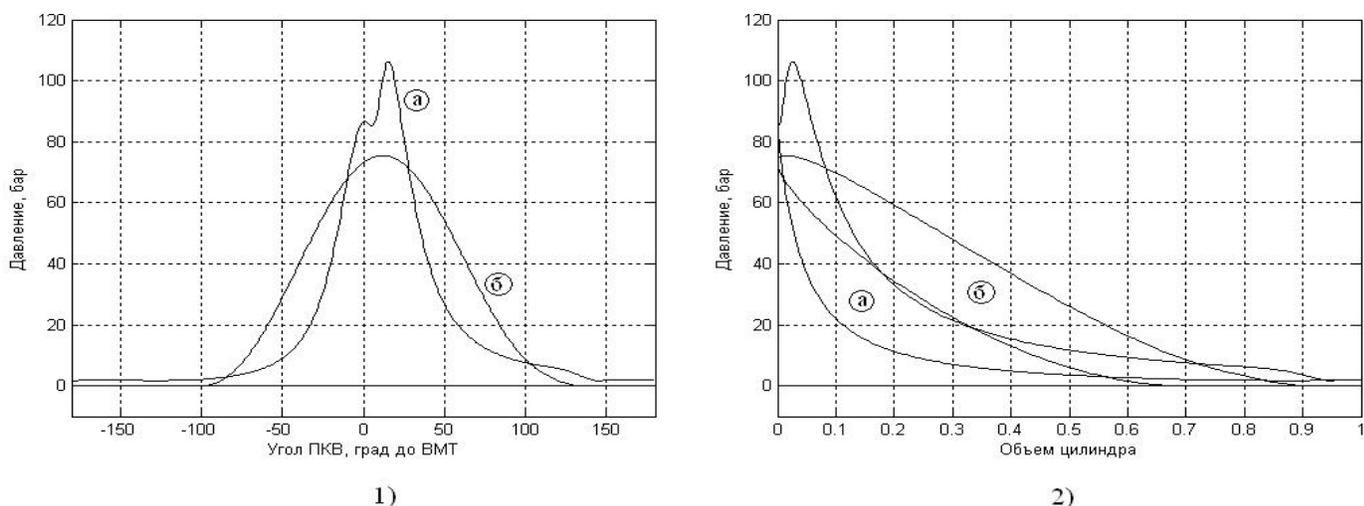


Рис. 2. Индикаторная диаграмма МОД, исходная (а) и синтезированная из двух гармоник (б), развернутая (1) и нормальная (2)

Исходная диаграмма МОД имеет показатели:  $p_{mi} = 13.6$  бар,  $P_{max} = 105$  бар. Показатели синтезированной диаграммы:  $p_{mi} = 14.6$  бар, а  $P_{max} = 76$  бар.

Таким образом, при примерно одинаковых средних индикаторных давлениях, у синтезированной диаграммы выигрыш по максимальному давлению цикла очевиден. Заметим также, что в цикле с двумя гармониками работа поршнем при его движении в цилиндре совершается более равномерно. В то же время у исходной диаграммы (рис. 2, нормальная диаграмма) по мере удаления поршня от верхней мертвой точки производимая им работа на единицу пути сильно уменьшается.

### Цикл ДВС в виде первой гармоники

Обработка многочисленных реальных индикаторных диаграмм показывает, что произведения  $P_{1max}\sin\varphi_1$  и  $P_{2max}\sin\varphi_2$ , входящие в выражение (2), примерно равны по величине, отличаясь не более чем на 10%. Поэтому, относительный вклад второй гармоники в  $p_{mi}$  фактически определяется коэффициентом  $\lambda/2$  формулы (2). Для  $\lambda=0,2\dots0,47$  этот вклад составляет соответственно  $0,1\dots0,235$ , что существенно меньше вклада первой гармоники. Большие значения соответствуют длинноходовым МОД, меньшие – средне- и высокооборотным судовым дизелям.

В этой связи возникает вопрос – насколько полезна вторая гармоника, ведь помимо вклада в среднее индикаторное давление она также повышает  $P_{max}$ . Это наглядно проявляется на рис. 1 – максимальное давление суммы первых двух гармоник существенно выше максимума первой гармоники. Поэтому важно выяснить, что сильнее возрастает при использовании второй гармоники - среднее индикаторное давление или максимальное давление.

Исследование, проведенное автором в работе [6], показало, что при условии постоянства  $p_{mi}$  по сравнению с циклом из одной первой гармоники введение второй гармоники увеличивает  $P_{max}$  на 0...15 % в диапазоне изменения  $\lambda=0,5...0,2$ . При этом для длинноходовых судовых МОД, у которых  $\lambda$  приближается к теоретическому пределу 0,5, практически нет разницы в значениях  $P_{max}$ , полученных для циклов, содержащих только одну первую гармонику или первые две гармоники. Для двигателей же с более низкими значениями  $\lambda$ , а это судовые средне- и высокооборотные дизели, с позиции снижения  $P_{max}$  теоретически более выгодным является цикл с одной первой гармоникой. В этом случае выражение (2) примет вид

$$p_{mi} = \frac{\pi}{2} P_{1max} \sin \varphi_1. \quad (3)$$

Индикаторные диаграммы двухтактного дизеля для этого случая показаны на рис. 3, а развернутая индикаторная диаграмма представляется выражением

$$p(\varphi) = p_0 + P_{1max} \cos(\varphi + \varphi_1).$$

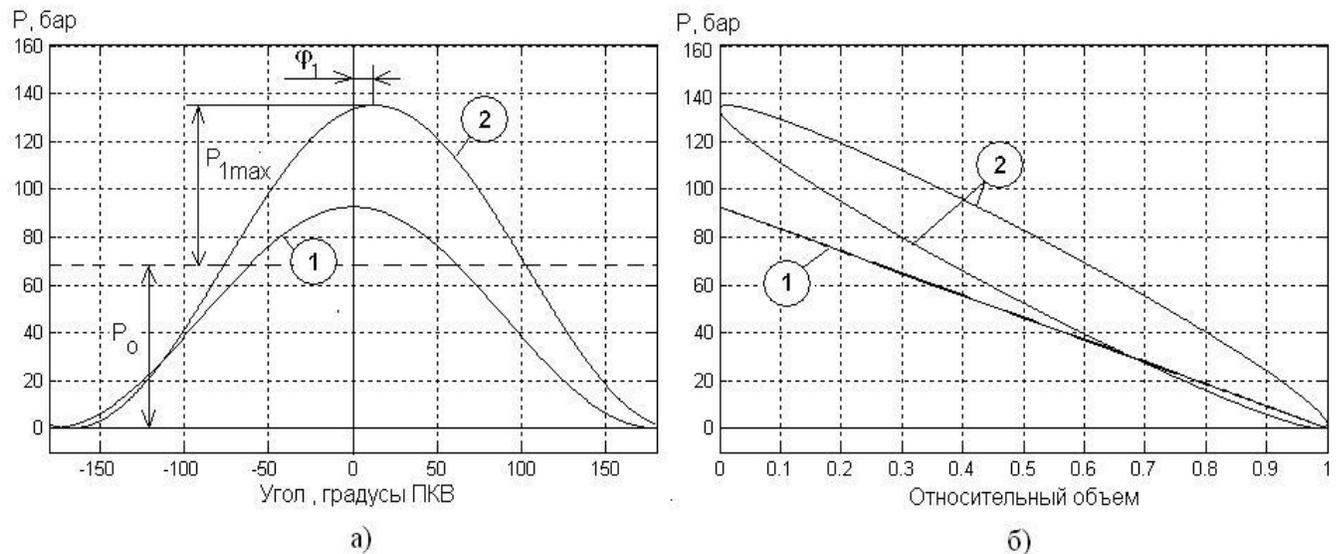


Рис. 3. Желаемая индикаторная диаграмма дизеля в виде первой гармоники, при отсутствии (1) и наличии (2) топливоподачи, развернутая (а) и нормальная (б)

В отсутствие топливоподачи (рис. 3, кривая а,1) цикл дизеля представляет собою косинусоиду, симметричную относительно верхней мертвой точки, при этом ее начальный фазовый сдвиг  $\varphi_1=0$ . Вследствие этого и среднее индикаторное давление, в соответствии с выражением (3), равно нулю. При наличии топливоподачи, за счет горения топлива косинусоида смещается в сторону процесса расширения на величину фазового угла  $\varphi_1$  (рис. 3, кривая а, 2). Это, а также некоторое увеличение  $P_{max}$ , и обеспечивают ненулевое значение среднего индикаторного давления. В функции объема цилиндра индикаторная диаграмма при наличии топливоподачи приобретает форму эллипса (рис. 3, б), вырождающегося в прямую линию при отключении топливоподачи. Обработка диаграмм, в том числе представленной на рис. 1, показывает, что в современных конструкциях судовых дизелей на нагрузках, близких к номинальным, фазовый сдвиг первой гармоники находится в диапазоне  $\varphi_1=12...14$  °ПКВ.

### Преимущества, новизна предложенных эталонных циклов

Представленные на рис. 2 и рис. 3 диаграммы в виде двух или одной гармоник могут использоваться в качестве эталонных циклов дизеля, являясь альтернативой

традиционным эталонам. Они обеспечивают наименьшее возможное значение максимального давления в цикле при заданном среднем индикаторном давлении, более низкие максимальные температуры цикла и, как следствие, снижение вредных выбросов (оксидов азота и др.), более благоприятные условия работы подшипников. Если цикл состоит только из первой гармоники, давление в цилиндре дизеля изменяется плавно, по синусоиде, как в цикле Стирлинга [2]. Это косвенно указывает на определенную общность процессов получения  $p_{mi}$  в ДВС и в двигателе Стирлинга.

Тенденция к применению более сглаженной формы индикаторной диаграммы подтверждается практикой современного судового дизелестроения [7]. В качестве примера на рис. 4 показана индикаторная диаграмма судового малооборотного дизеля с электронным управлением типа *6SME-C* фирмы *MAN B&W*. на режиме с уменьшенным количеством выбросов оксидов азота. Ее спектральный анализ (рис. 5) показывает существенное снижение доли высших гармоник и на этом фоне усиление первых двух гармоник.

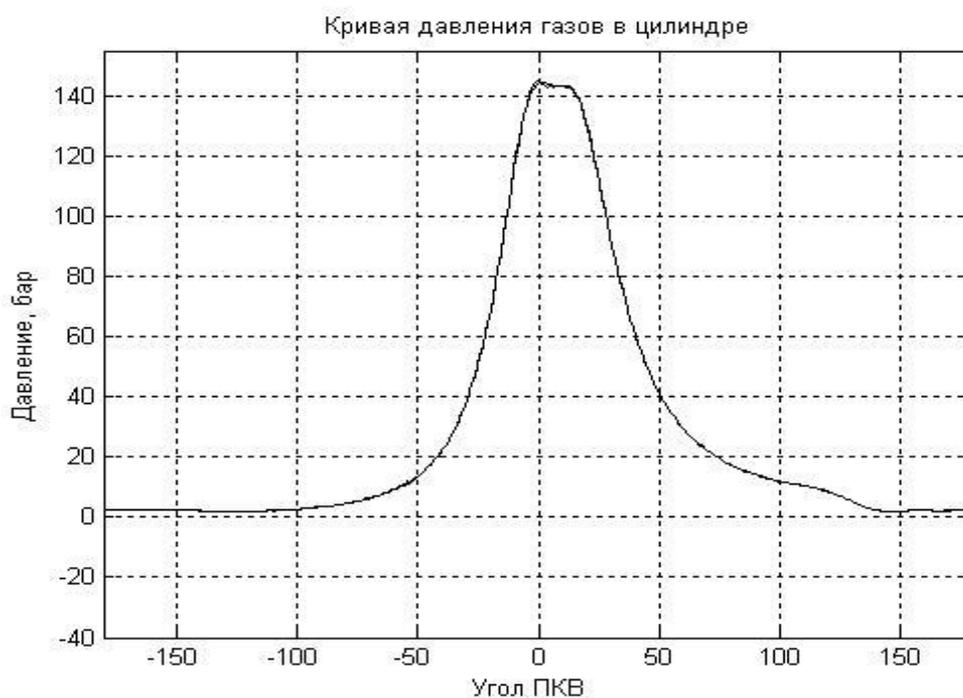


Рис. 4. Индикаторная диаграмма МОД типа *6SME-C* на режиме с уменьшенным количеством выбросов оксидов азота, частота вращения 91 об/мин.

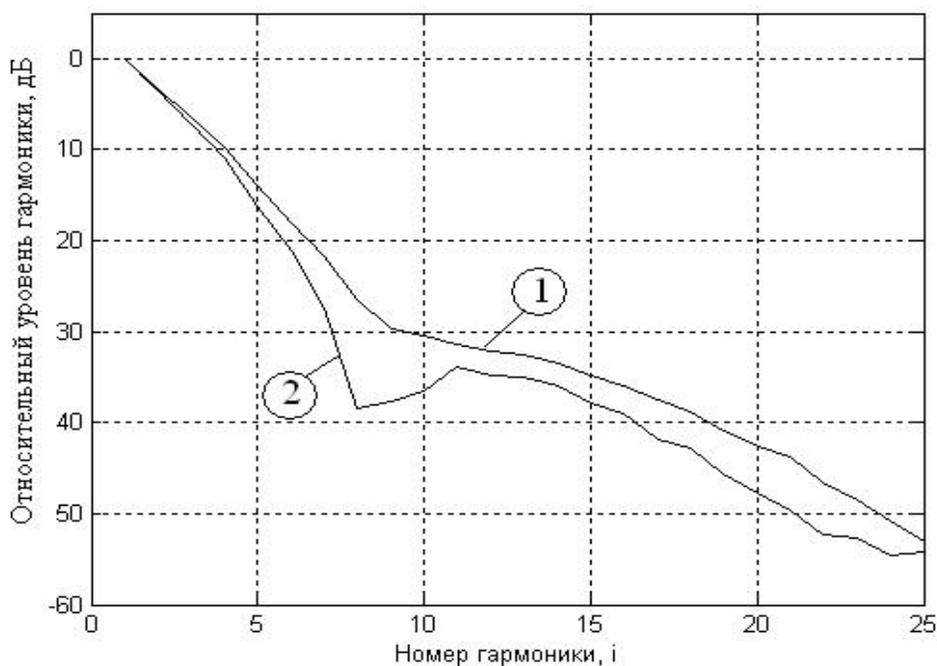


Рис. 5 Спектральный состав диаграммы традиционного вида (кривая 1) и диаграммы, представленной на рис. 4 (кривая 2)

### Заключение

Практическая реализация предложенных эталонных циклов в виде одной или двух гармоник, безусловно, будет сопровождаться теми или иными отклонениями от желаемой формы. Важно однако отметить, что в настоящее время их реализация принципиально возможна, в связи с появлением нового поколения судовых дизелей - с электронным управлением. В таких двигателях электронными средствами реализуется управление подачей топлива в цилиндры, выпускными клапанами и др. При этом возможно оперативное и гибкое формирование не только желаемого закона топливоподачи, но и процесса горения топлива, фаз газораспределения, а в конечном итоге – формы индикаторной диаграммы, как это иллюстрирует рис. 4. Наибольшие возможности для этого имеются в мощных судовых МОД, где процессы протекают сравнительно медленно.

## Список литературы

1. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для вузов / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.- 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1983.- 372 с.
2. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга: пер. с англ.- М.: Мир, 1986.- 464 с.
3. Танатар Д.Б. Судовые дизели. Теория рабочего процесса.- Л.: Морской транспорт, 1962.- 306 с.
4. Самойленко А.Ю. Определение среднего индикаторного давления на основе гармонического анализа индикаторной диаграммы дизеля // Двигателестроение.- 2004.- № 1. - С. 17-19.
5. Самойленко А.Ю. Определение среднего индикаторного давления по параметрам гармоник развернутой индикаторной диаграммы дизеля // Сборник научных трудов НГМА.- Новороссийск: НГМА, 2005.- Вып.10.- С. 179-183.
6. Самойленко А.Ю., Шостак Н.А. Максимальное давление индикаторной диаграммы, представленной суммой гармоник // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.- 2008.- Спец. выпуск.- С. 64-67.
7. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учеб. пособие.- М.: Машиностроение, 2005.- 512 с.

## Alternative ideal cycle of internal-combustion engine

# 08, August 2012

DOI: 10.7463/0812.0475919

Samoilenko A.Yu.

Russia, Novorossiysk State Maritime University The Admiral FF Ushakov  
[say-nvrsk@yandex.ru](mailto:say-nvrsk@yandex.ru)

Basing on the harmonic analysis of the indicator diagram, the author proposes a cycle in which pressure varies in a cosine curve. Due to the fact that the second harmonic also contributes to the mean indicated pressure, the author considered the ideal cycle option as the sum of two harmonics. In contrast to conventional cycles, the proposed cycle provides the smallest possible value of the maximum pressure at a given mean indicated pressure. The material of this paper can be used in development of advanced electronic fuel control systems in high-power marine diesel engines.

---

**Publications with keywords:**[harmonic analysis](#), [maximum cycle pressure](#), [mean indicator cycle pressure](#), [internal combustion engine](#), [indicator diagram](#)

**Publications with words:**[harmonic analysis](#), [maximum cycle pressure](#), [mean indicator cycle pressure](#), [internal combustion engine](#), [indicator diagram](#)

---

### References

1. Vyubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I., et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: Teoriia porshnevykh i kombinirovannykh dvigatelei: ucheb. dlia vuzov* [Internal combustion engines: the Theory of piston and combined engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1983.372 p.
2. Reader G., Hooper C. *Stirling engines*. London and New York, E. & F. N. Spon, 1983. (Russ. ed.: Rider G., Khuper Ch. *Dvigateli Stirlinga*. Moscow, Mir, 1986. 464 p.).
3. Tanatar D.B. *Sudovye dizeli. Teoriia rabochego protsessa* [Marine diesel engines. Theory of the working process]. Leningrad, Morskoi transport, 1962. 306 p.

4. Samoilenko A.Iu. Opredelenie srednego indikatornogo davleniia na osnove garmonicheskogo analiza indikatornoi diagrammy dizelia [Definition of the middle indicator of the pressure on the basis of the harmonic analysis of the indicator of the diagram of the diesel engine]. *Dvigatelistroenie* [Engine-building], 2004, no. 1, pp. 17-19.

5. Samoilenko A.Iu. Opredelenie srednego indikatornogo davleniia po parametram garmonik razvernutoi indikatornoi diagrammy dizelia [Definition of the middle indicator pressure by the parameters of the harmonics of a detailed indicated diagram of the diesel engine]. *Sbornik nauchnykh trudov NGMA* [Collection of scientific works of NSMA]. Novorossiisk, NSMA Publ., 2005, iss.10, pp. 179-183.

6. Samoilenko A.Iu., Shostak N.A. Maksimal'noe davlenie indikatornoi diagrammy, predstavlennoi summoi garmonik [Maximum pressure indicator diagram presented by the sum of harmonics]. *Izvestiia VUZov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Universities. The North-Caucasian region. Technical Sciences], 2008, Special Iss., pp. 64-67.

7. Konks G.A., Lashko V.A. *Mirovye sudovoe dizelestroenie. Kontseptsii konstruirovaniia, analiz mezhdunarodnogo opyta* [Global marine diesel engine manufacturing. The concept of construction, the analysis of international experience]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 512 p