

## Применение преобразования Гильберта-Хуанга для контроля работы топливного дозатора двигателя внутреннего сгорания

*А.Р. Загретдинов, Ю.В. Ваньков, Ившин И.В., Низамиев М.Ф.*

*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

**Аннотация:** В статье приведены результаты обработки виброакустических сигналов с помощью преобразования Гильберта-Хуанга, полученных в ходе испытания двигателя внутреннего сгорания. Описан порядок проведения экспериментов и методика обработки виброакустических сигналов.

**Ключевые слова:** преобразование Гильберта-Хуанга, спектр Гильберта, эмпирическая модовая декомпозиция, декомпозиция по ансамблю, спектр Фурье, вейвлет-преобразование, диагностика, неразрушающий контроль, двигатель внутреннего сгорания, виброакустический сигнал.

### Введение

В настоящее время в современных системах диагностики и неразрушающего контроля проблема частотно-временного преобразования виброакустических сигналов решается применением вейвлет-анализа [1-3]. Однако достоверность такой обработки сигналов во многом зависит от правильности выбора базисной функции преобразования.

Сравнительно недавно разработан метод Гильберта-Хуанга не требующий априорного функционального базиса преобразования [4-7]. Здесь функции базиса получаются адаптивно непосредственно из самих сигналов процедурами отсеивания «эмпирических мод» или «внутренних колебаний» (IMF).

В работе приводятся результаты обработки виброакустических сигналов с помощью метода Гильберта-Хуанга, полученных в ходе испытания двигателя внутреннего сгорания.

### Описание экспериментальной установки и порядок проведения экспериментов

Серия экспериментов проводилась в испытательной лаборатории на моторном стенде (восьмицилиндровом двухтактном двигателе).

---

Измерения виброакустических сигналов проводились для периодов, когда двигатель работает в нормальном режиме и когда один из цилиндров не исправен (отключена подача питания на топливный дозатор). Структурная схема измерительной системы [8,9] представлена на рис. 1.



Рис. 1. – Структурная схема измерительной системы, где ЛВ – лазерный виброметр LV-2, АЦП – аналого-цифровой преобразователь BNC6251, ПК – персональный компьютер с программным обеспечением LabVIEW

Лазерный виброметр позволяет проводить дистанционное бесконтактное измерение вибрации в диапазоне частот от 2 Гц до 30 кГц. Для преобразования полученных от датчиков входных аналоговых сигналов в цифровой сигнал используется аналого-цифровой преобразователь NI USB-6251 с 16-битным разрешением.

Лазерный виброметр устанавливался на расстоянии 2 метров от моторного стенда и его луч наводился на головку цилиндра, отключение которого предполагалось в процессе экспериментов.

Работа моторного стенда проводилась с частотой оборотов коленвала 2200 об/мин. Регистрация виброакустических сигналов осуществлялась с частотой дискретизации 40000 Гц.

### **Методика обработки виброакустических сигналов**

Для обработки виброакустических сигналов применялся метод Гильберта-Хуанга, включающий в себя процедуру модовой декомпозиции по ансамблю, который заключается в следующем [4,7,10].

1. К сигналу  $y(t)$  добавляется белый шум  $\xi_n$  с заданным соотношением сигнал/шум:

$$y_{\xi}(t) = y(t) + \xi_n \quad (1)$$

2. В сигнале  $y_{\xi}(t)$  определяется положение локальных экстремумов (определяются все пики и впадины).

3. Кубическим сплайном вычисляется верхняя  $u_a(t)$  и нижняя  $u_b(t)$  огибающие процесса соответственно, проходящие через максимумы и минимумы нормированного сигнала. Определяется функция средних значений  $m_1(t)$  между огибающими:

$$m_1(t) = \frac{u_a(t) + u_b(t)}{2}$$

Разность между сигналом  $y_{\xi}(t)$  и функцией  $m_1(t)$  дает первую компоненту отсеивания – функцию  $h_1(t)$ , которая является первым приближением к первой функции IMF:

$$h_1(t) = y(t) - m_1(t) \quad (2)$$

4. Повторяются операции 2 и 3, принимая вместо  $y(t)$  функцию  $h_1(t)$ , и находится второе приближение к первой функции IMF – функция  $h_2(t)$ .

$$h_2(t) = h_1(t) - m_2(t) \quad (3)$$

Останов операций отсеивания осуществляется по заданному ограничению числа итераций (не более 10).

5. Последнее значение  $h_i(t)$  итераций принимается за наиболее высокочастотную функцию  $c_1(t) = h_i(t)$  семейства IMF, которая непосредственно входит в состав сигнала  $y_{\xi}(t)$ . Это позволяет вычистить  $c_1(t)$  из состава сигнала и оставить в нем более низкочастотные составляющие  $r_1(t)$ :

$$r_1(t) = y_{\xi}(t) - c_1(t) \quad (4)$$

6. Полученный остаток  $r_1(t)$  становится новым временным рядом для декомпозиции, повторяются операции 2-5. Декомпозиция завершается, когда

остаток  $r_n(t)$  является монотонной функцией.

6. Шаги 1-6 повторяются  $N_E$  раз (где  $N_E$  - ансамблевое число). Здесь каждый раз к сигналу  $y(t)$  добавляется заново генерированный шум  $\xi_n$ , на каждом шаге запоминается результат декомпозиции.

7. Выделенные моды усредняются по ансамблю:

$$s_i(t) = \tilde{c}_i(t) \quad (5)$$

где  $\tilde{c}_i(t)$  - усредненная по ансамблю  $i$ -ая функция IMF.

8. Определяется функция  $v(t)$ , сопряженная к IMF по Гильберту:

$$v(t) = F^{-1} \{ -j \operatorname{sgn}(f) X(f) \} \quad (6)$$

где  $F^{-1}$  - обратное преобразование Фурье,  $X(f)$  - результат преобразования Фурье функции  $s(t)$  IMF,  $\operatorname{sgn} = \begin{cases} 1 & f > 0 \\ 0 & f = 0 \\ -1 & f < 0 \end{cases}$ ,  $f$  - гармоника

сигнала.

9. Для каждой IMF вычисляются значения мгновенной частоты  $w(t)$  и амплитуды  $a(t)$ .

Мгновенная амплитуда:

$$a(t) = \sqrt{s^2(t) + v^2(t)} \quad (7)$$

где  $s(t)$  - денормированная и усредненная по ансамблю функция IMF,  $v(t)$  - функция, сопряженная к IMF по Гильберту.

Мгновенная частота:

$$w(t) = \dot{\varphi}(t) = \frac{s(t)\dot{v}(t) - \dot{s}(t)v(t)}{a^2(t)}, \quad (8)$$

где  $\varphi(t) = \operatorname{arctg} \left( \frac{v(t)}{s(t)} \right)$  - мгновенная фаза. (9)

10. Строится спектр Гильберта на графике интенсивности, где на частотно-временной плоскости значение амплитуды обозначается соответствующим цветом.

### Результаты обработки виброакустических сигналов

Результаты обработки виброакустических сигналов с помощью преобразования Гильберта-Хуанга представлены на рис. 2-3. К нормированному сигналу добавлялся белый шум  $\xi_n$  с соотношением сигнал/шум 18,7 дБ, ансамблевое число  $N_E=100$ .

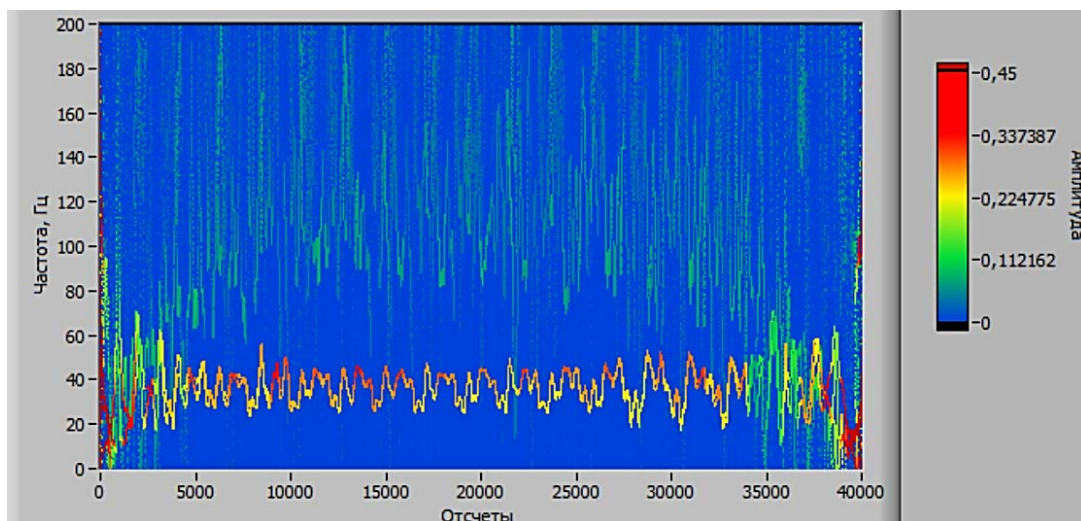


Рис. 2. – Спектр Гильберта исправно работающего двигателя

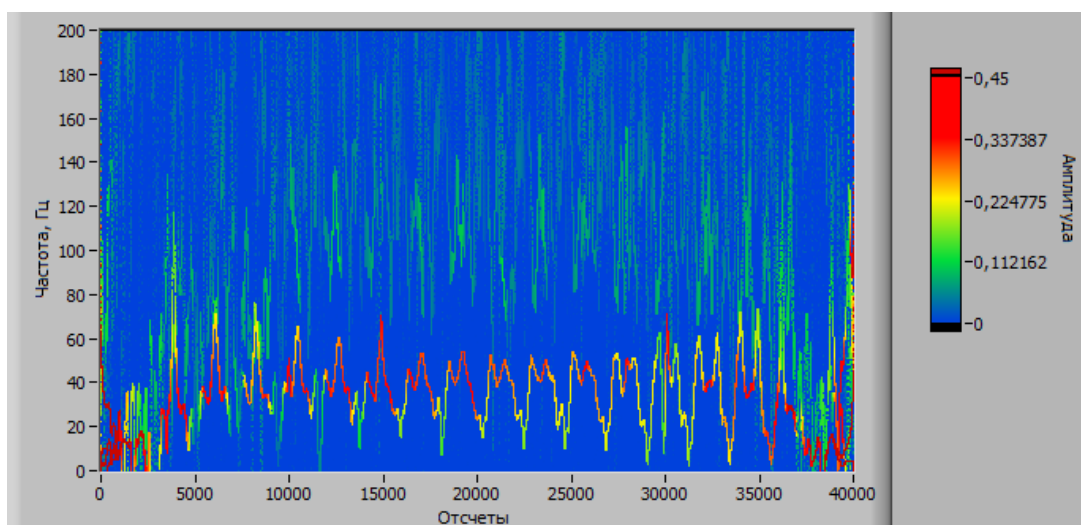


Рис. 3. – Спектр Гильберта двигателя с отключенным топливным дозатором одного из цилиндров

Из рисунков видно, что основные гармонические составляющие сигнала сосредоточены относительно отметки 36,7 Гц. Эта частота соответствует заданной во время экспериментов частоте оборотов коленвала 2200 об/мин. При отключении в одном из цилиндров зажигания, на спектрах Гильберта отчетливо видно появление новых частотных составляющих, в то время как различия в спектрах Фурье (рис. 4-5) не значительны. Следует отметить, что спектры Гильберта содержат побочные колебания по краям временного интервала (краевые эффекты). Эти искажения связаны с применением интерполяционных сплайнов, а также преобразования Гильберта для определения мгновенной частоты.

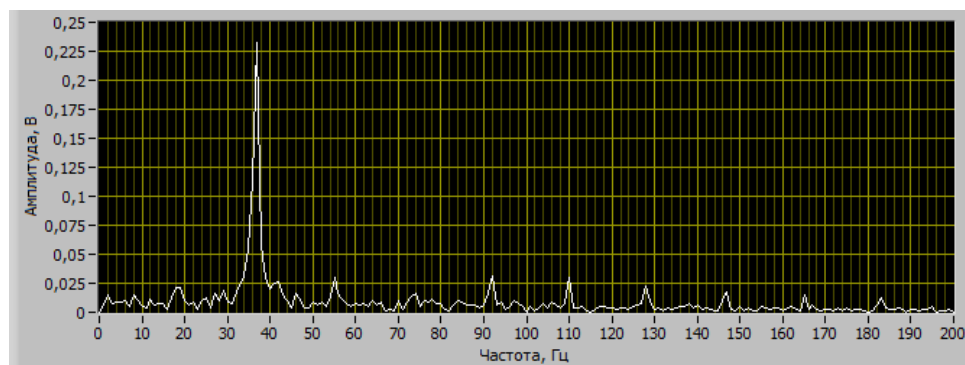


Рис. 4. – Спектр Фурье исправно работающего двигателя

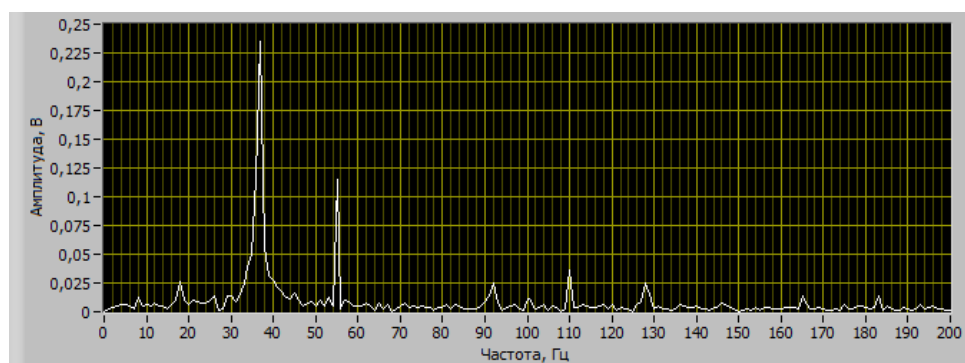


Рис. 5. – Спектр Фурье двигателя с отключенным топливным дозатором одного из цилиндров

На рис. 6 показаны фрагменты спектров Гильберта, взятые на временных интервалах без краевых эффектов, а также соответствующие им виброакустические сигналы. Как и формы сигналов, спектры Гильберта

имеют существенные отличия. Для исправного двигателя наличие основных частот на выбранных участках (рис. 6) характеризуется диапазоном от 23 до 48 Гц, а двигателя с отключенным топливным дозатором – от 6 до 56 Гц.

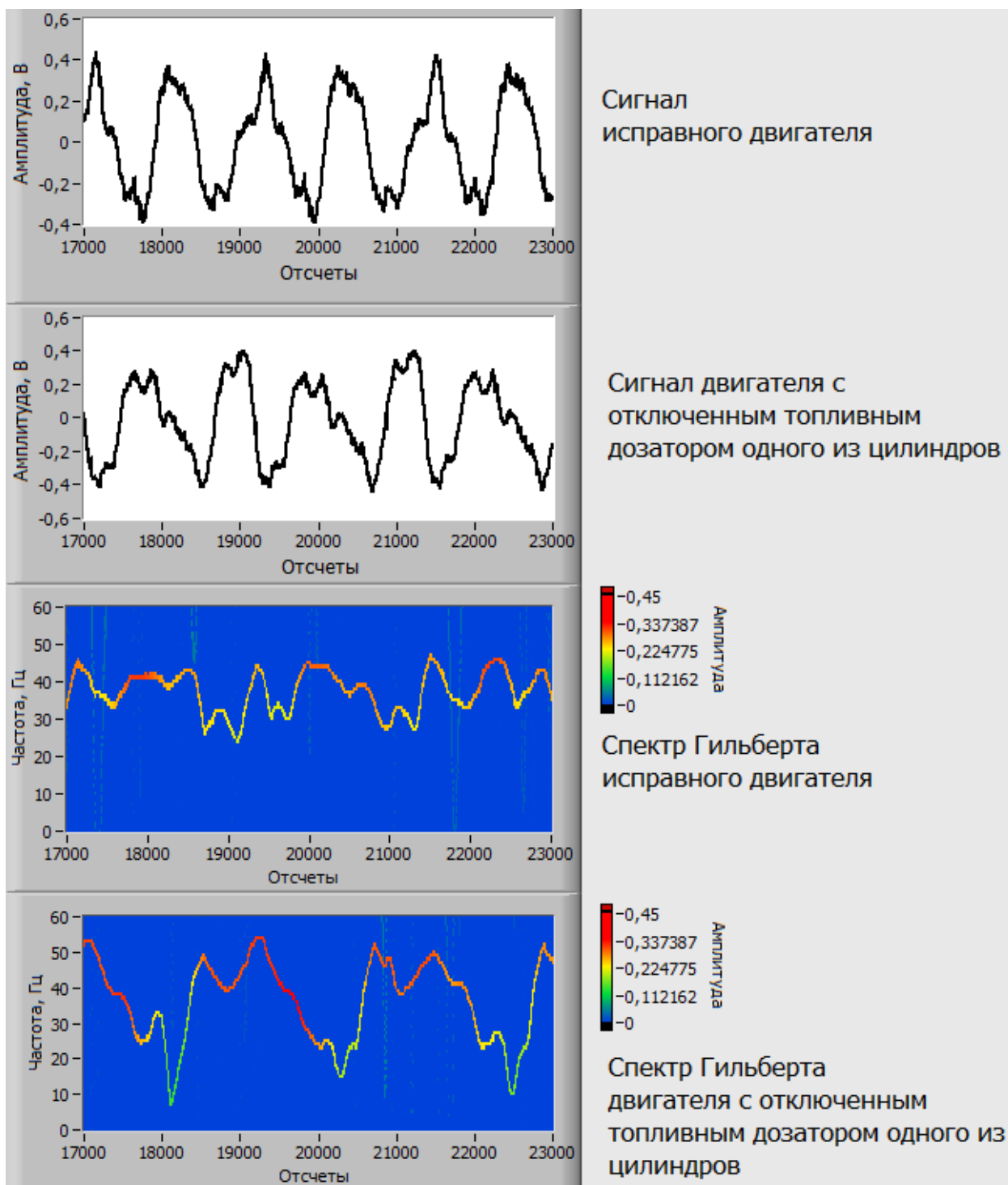


Рис. 6. – Сопоставление виброакустических сигналов и спектров Гильберта

## Заключение

Преобразование Гильберта-Хуанга позволяет извлечь из сигналов информацию о быстрых временных изменениях их спектрального состава. При этом не требуется выбора базисной функции разложения, от которой во многом зависит разрешающая способность частотно-временного преобразования. Спектры Гильберта просты в интерпретации и анализе полученных результатов. Приведенные в статье результаты подтверждают возможность применения преобразования Гильберта-Хуанга для виброакустического контроля технического оборудования.

## Литература

1. Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Петрушенко Ю.Я. Оценка технического состояния подшипников качения виброакустическим методом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №2. С. 55-57.
2. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. №2. С. 141-157.
3. Brémaud P. Mathematical Principles of Signal Processing. Fourier and Wavelet Analysis // Springer Science & Business Media. 2002. 263 p.
4. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.
5. Huang N. E., Wu M. C., Long S. R. et al. A confidence limit for empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis // Proc. R. SOC. London, Ser. A. 2003. № 459. pp. 2317–2345.
6. Загретдинов А.Р., Гапоненко С.О., Серов В.В. Концепция оценки технического состояния оборудования на основе ННТ- преобразования



вибраокустических сигналов // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3243.

7. Сафиуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дис. канд. техн. наук: 05.13.01. Новосиб., 2015. 193 с.

8. Ваньков Ю.В., Ившин И.В., Загретдинов А.Р., Низамиев М.Ф. Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 5. С 141-143.

9. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 108.

10. Загретдинов А.Р., Бусаров А.В., Бусаров В.В. Сравнение методов останова операций отсеивания при эмпирической модовой декомпозиции сигналов. // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238.

### References

1. Akutin M.V., Van'kov Yu.V., Kondrat'ev A.E., Petrushenko Yu.Ya. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2009. №2. pp. 55-57.
2. Pavlov A.N., Filatova A.E., Khramov A.E. Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika. 2011. №2. pp. 141-157.
3. Brémaud P. Mathematical Principles of Signal Processing. Fourier and Wavelet Analysis. Springer Science & Business Media. 2002. 263 p.
4. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.



5. Huang N. E., Wu M. C., Long S. R. et al. A confidence limit for empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. Proc. R. SOC. London, Ser. A. 2003. № 459. pp. 2317–2345.
6. Zagretdinov A.R., Gaponenko S.O., Serov V.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3243](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3243).
7. Safiullin N.T. Razrabotka metodiki analiza vremennykh ryadov s pomoshch'yu preobrazovaniya Khuanga-Gil'berta [The method of time series analysis using the Hilbert-Huang transform]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.01. Novosibirsk, 2015. 193 p.
8. Van'kov Yu.V., Ivshin I.V., Zagretdinov A.R., Nizamiev M.F. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. № 5. pp. 141-143.
9. Nizamiev M.F., Ivshin I.V., Vladimirov O.V., Van'kov Yu.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2014. №3-4. p. 108.
10. Zagretdinov A.R., Busarov A.V., Busarov V.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3238).