

Разработка параметрической модели сигнала ионного тока для ходовых двигателей подвижных объектов

В.В. Мациборко, З.А. Понимаиш, М.А. Береснев, М.А. Мациборко

Инженерно-Технологическая Академия Южного Федерального Университета, Таганрог

Аннотация: В статье представлены результаты аппроксимации сигнала ионного тока наиболее подходящими параметрическими моделями в программной среде Matlab. Показано, что несмотря на высокую точность аппроксимации, подобранные параметрические модели Гаусса имеют существенные недостатки. Для устранения выявленных недостатков авторами была разработана параметрическая модель, в которой для аппроксимации сигнала ИТ использовалось дискретное преобразование Фурье.

Ключевые слова: ионный ток, двигатель внутреннего сгорания, параметрическая модель, дискретное преобразование Фурье, модель Гаусса, аппроксимация сигнала.

Выполнение ужесточающихся норм токсичности, предъявляемых к транспортным средствам, а также необходимость внедрения бортовой диагностики двигателей внутреннего сгорания (далее ДВС), обеспечивающей на протяжении всего периода работы двигателя непрерывный контроль механических и электронных узлов, своевременное выявление неисправностей и подачу управляющих воздействий для устранения некорректной работы ДВС, ведет к необходимости применения более эффективных методов контроля сгорания топливо-воздушной смеси (далее ТВС) и работы двигателя в целом [1, 2].

Одним из перспективных направлений решения этой проблемы являются методы и методики, основанные на анализе сигнала ионного тока (далее ИТ), применение которых позволяет решать задачи обнаружения пропусков воспламенения, диагностики детонации, определять максимальное давление и температуру в цилиндрах ДВС, а также при помощи применения специализированных алгоритмов определять неисправности двигателя [3-8].

Основной задачей данной работы является разработка параметрической модели сигнала ионного тока, позволяющей с высокой точностью

аппроксимировать сигнал при различных режимах работы и техническом состоянии ДВС.

Ранее авторами в работе [9] была выполнена аппроксимация сигнала ионного тока параметрическими моделями в программной среде Matlab. При этом наиболее приближенной оказалась модель Гаусса. На рисунке 1 представлен график сигнала ионного тока с графиком приближения – кривой Гаусса второго порядка, а на рисунке 2 представлен график сигнала ионного тока с графиком приближения – кривой Гаусса четвертого порядка.

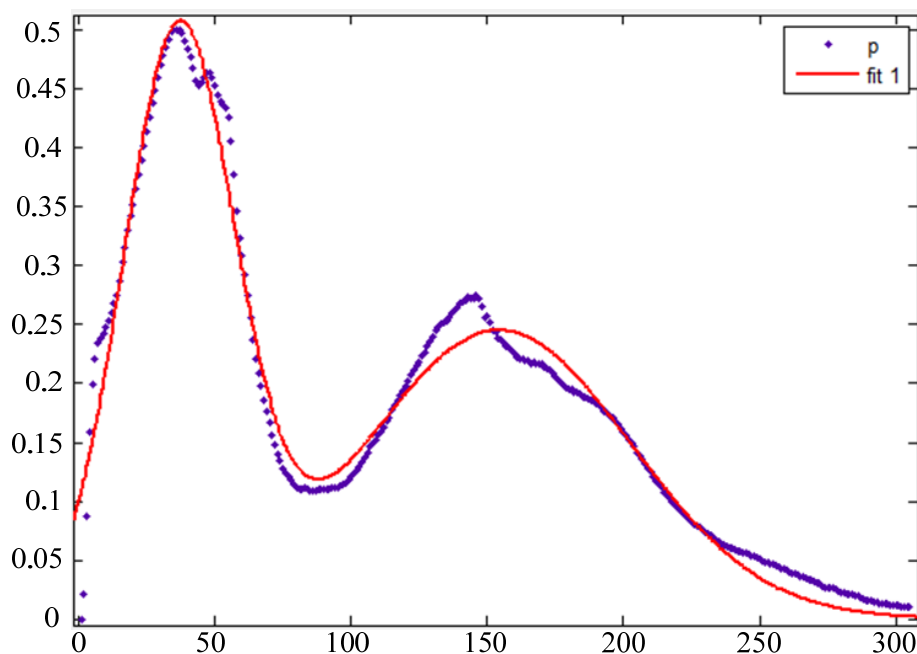


Рис. 1 – Подбор кривой Гаусса второго порядка

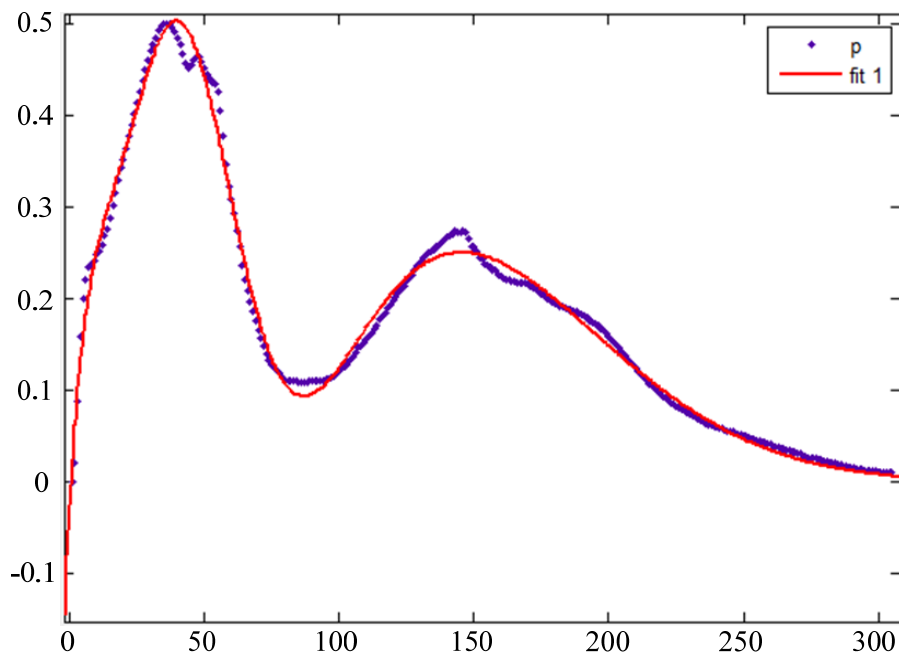


Рис. 2 – Подбор кривой Гаусса четвертого порядка

Как видно из представленных выше рисунков, наиболее приближенно сигнал ИТ аппроксимирует модель Гаусса четвертого порядка, функция которой выглядит следующим образом:

$$f(x) = a_1 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right) + a_3 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2\right) + a_4 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_4}{c_4}\right)^2\right)$$

Несмотря на относительно высокую точность аппроксимации модель Гаусса четвертого порядка имеет существенные недостатки – это сложность вычисления, которая является препятствием при обработке вектора данных сигнала ИТ, и как следствие причиной некорректной работы системы регистрации и анализа данных. Вторым существенным недостатком является отсутствие возможности адаптации параметрической модели к различной форме сигнала, которая будет меняться в зависимости от нагрузки на двигатель, его технического состояния и оборотов.

Для устранения изложенных выше недостатков в рамках данной работы разработана параметрическая модель, в которой для аппроксимации сигнала ИТ использовалось дискретное преобразование Фурье (далее ДПФ)

[10], являющееся одним из наиболее подходящих инструментов для спектрального анализа сигналов.

Разработанная при помощи ДПФ функция параметрической модели выглядит следующим образом:

$$S(t) = 2,5 * \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(t-c_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{v_2}{v_1} * \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(t-c_2)^2}{2\sigma_2^2}} \right),$$

где $S(t)$ - выходной сигнал, t -время, c_1 -центр первого пика сигнала ИТ, $\sigma_1 - \frac{1}{6}$ ширины первого пика сигнала ИТ, c_2 -центр второго пика сигнала ИТ, $\sigma_2 - \frac{1}{6}$ ширины второго пика сигнала ИТ, $\frac{v_1}{v_2}$ - отношение амплитуды первого пика к амплитуде второго пика сигнала ИТ.

Проверка и доработка представленной функции параметрической модели ИТ была выполнена в программе, разработанной авторами на языке программирования С#. Для тестирования был использован оцифрованный сигнал ионного тока без искрового пробоя, представленный на рисунке 3.

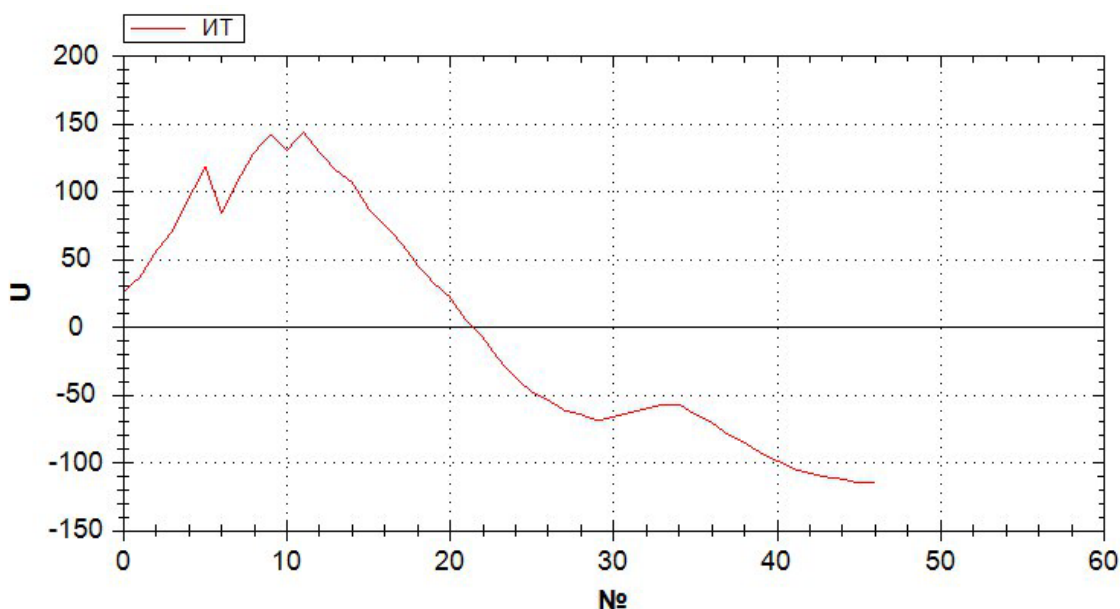


Рис. 3 – Оцифрованный график сигнала ионного тока

На рисунке 4 представлен график сигнала ионного тока с графиком приближения – параметрической моделью сигнала ионного тока, разработанной при помощи ДПФ.

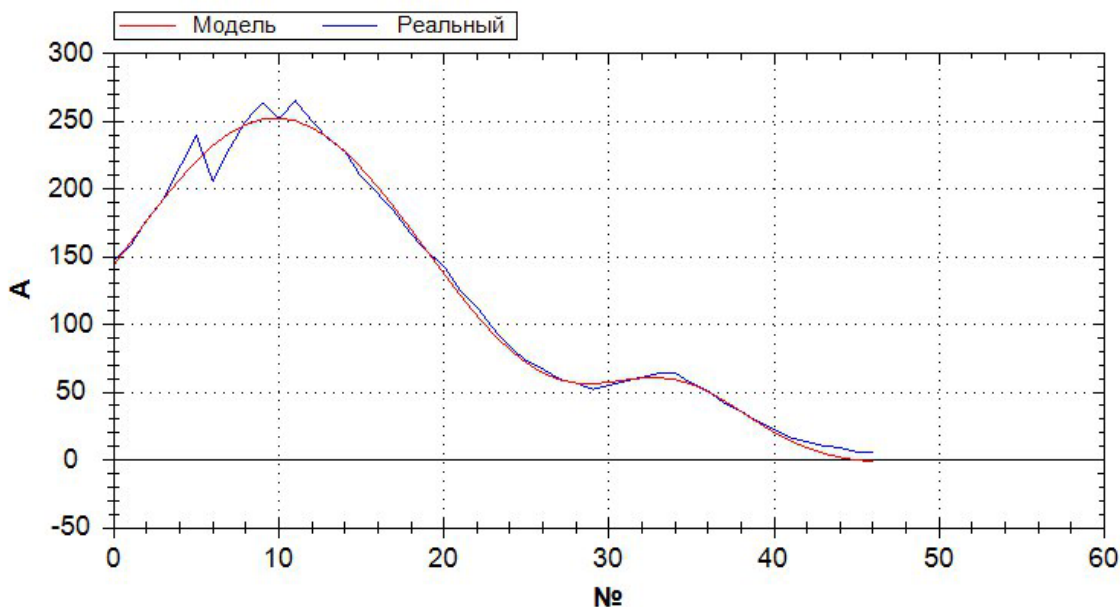


Рис. 4 – График оцифрованного сигнала ИТ (синяя линия) и график приближения – параметрическая модель сигнала ионного тока, разработанная при помощи ДПФ (красная линия)

С целью определения эффективности параметрической модели ДПФ было выполнено её сравнение с наиболее приближенной моделью Гаусса седьмого порядка в программной среде Matlab. Для аппроксимации был также использован оцифрованный сигнал ИТ, который представлен на рисунке 3. На рисунке 5 изображен график сигнала ионного тока с графиком приближения – кривой Гаусса седьмого порядка.

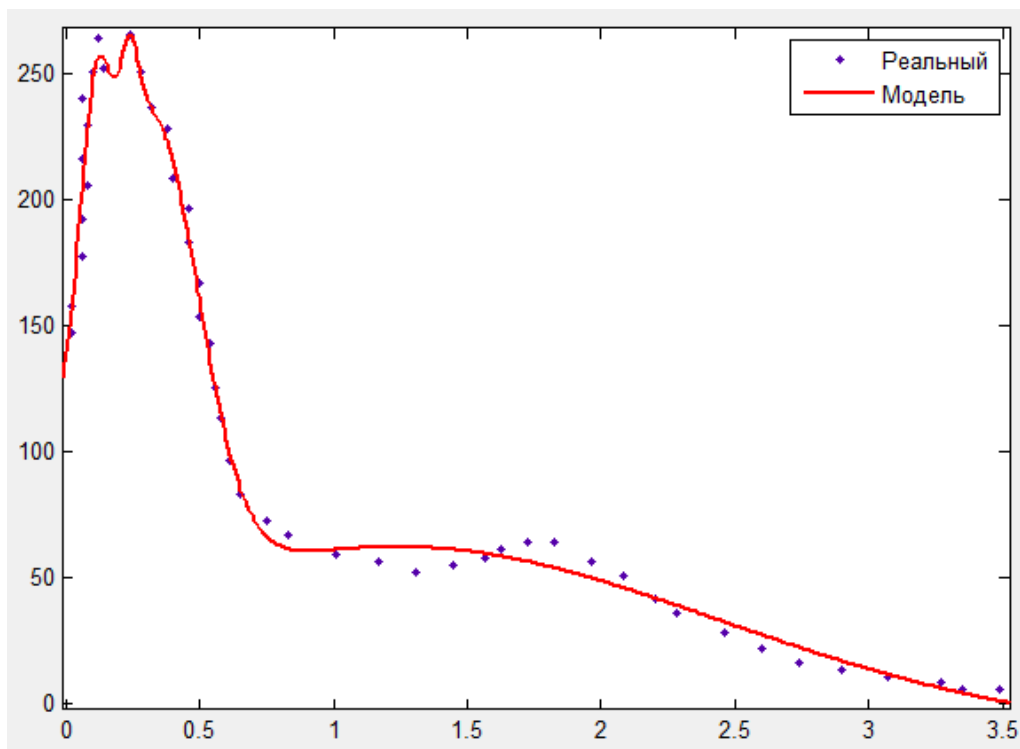


Рис. 5 – График оцифрованного сигнала ИТ (синие точки) и график приближения – кривая Гаусса седьмого порядка (красная линия)

Функция подобранной параметрической модели Гаусса седьмого порядка представлена ниже:

$$f(x) = a_1 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right) + a_3 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2\right) + a_4 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_4}{c_4}\right)^2\right) + a_5 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_5}{c_5}\right)^2\right) + a_6 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_6}{c_6}\right)^2\right) + a_7 * \exp\left(-\left(\frac{x-b_7}{c_7}\right)^2\right)$$

Таким образом, следует сделать вывод о том, что разработанная при помощи ДПФ параметрическая модель ИТ позволяет аппроксимировать сигнал с высокой точностью и достоверностью, при этом функция данной модели является упрощенной в сравнении с функциями стандартных параметрических моделей сигнала ИТ, подобранных в программной среде Matlab и предоставляет возможность аппроксимации сигнала с постоянными составляющими при различных режимах работы и техническом состоянии ДВС.

На практике разработанная параметрическая модель может использоваться для создания эталонных моделей сигнала ионного тока при различных оборотах и режимах работы ДВС в каждом отдельном цилиндре с целью обработки и анализа вектора данных сигнала, а также подачи управляющих воздействий для поддержания оптимального пика давления [6] в камере сгорания двигателя.

Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, НИР по государственному заданию ВУЗам и научным организациям в сфере научной деятельности (№114041540005).

Литература

1. Eriksson L., Nielsen L., Glavenius M. Closed Loop Cycle Ignition Control by Ion Current Interpretation// Linkoping University, SAE 970854, 1998. pp. 1216-1223.
2. Balles, E., VanDyne, E., Wahl, A., Ratton, K. et al., "In-Cylinder Air/Fuel Ratio Approximation Using Spark Gap Ionization Sensing," SAE Technical Paper 980166, 1998, doi:10.4271/980166.
3. А.Л. Береснев, А.Ю. Будко. Повышение эффективности теплоэнергетических установок методом контроля горения топлива по сигналу ионного тока // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973/.
4. Ладоша Е.Н. Имитация рабочего процесса поршневых двигателей на основе моделей химических реакций, турбулентности и теплообмена // Инженерный вестник Дона, 2008, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/78/.
5. Смоленский В.В. Применение метода самоорганизации для мониторинга ионных токов в камерах сгорания тепловых двигателей //

сборник статей в международной заочной научной конференции. ПВГУС, Тольятти, 2008 – с. 2-7 URL: tolgas.ru/org_structura/kaf_se/science/g2008/.

6. Andersson I. Cylinder Pressure and Ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines// Linkoping University, ISBN 91-7373-379-2, 2002. 93 p.

7. Shamekhi A. H., Ghaffari A. Ion Current Simulation During the Post Flame Period in SI Engines// IJCCE, Vol. 24, No. 2, 2005. pp. 51-58.

8. Wickstrom N., Larsson M., Taveniku M., Linde A., etc. Neural Virtual Sensors - Estimation of Combustion Quality in SI Engines using the Spark Plug// International Conference on Artificial Neural Networks ICANN 98, 1998. pp. 215-220.

9. Мациборко В.В., Мациборко М.А., Береснев А.Л. Обработка сигнала ионного тока в программной среде MatLab //Сборник научных статей, посвященных проблемам филологических, педагогических, исторических, юридических, социально-экономических, естественных, инженерно-технических наук. КГУ, Элиста, 2015 – С. 573-576.

10. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling et al. Numerical recipes in C. The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 2-nd edition, ISBN 0-521-43 108-5, 2002. 965 p.

References

1. Eriksson L., Nielsen L., Glavenius M. Linkoping University, SAE 970854, 1998. pp. 1216-1223.

2. Balles, E., VanDyne, E., Wahl, A., Ratton, K. et al., "In-Cylinder Air/Fuel Ratio Approximation Using Spark Gap Ionization Sensing," SAE Technical Paper 980166, 1998, doi:10.4271/980166.

3. Beresnev A.L., Budko A.Y. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973/.

4. Ladosha E.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2008, №2 URL:



ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/78/.

5. Smolenskij V.V. Sbornik statej v mezhdunarodnoj zaochnoj nauchnoj konferencii. PVGUS (Collection of articles v International extramural scientific conference. PVGUS), Tol'jatti, 2008. pp. 2-7. URL: tolgas.ru/org_structura/kaf_se/science/g2008/.

6. Andersson I. Linkoping University, ISBN 91-7373-379-2, 2002. 93 p.

7. Shamekhi A. H., Ghaffari A. IJCCE, Vol. 24, No. 2, 2005. pp. 51-58.

8. Wickstrom N., Larsson M., Taveniku M., Linde A., etc. International Conference on Artificial Neural Networks ICANN 98, 1998. pp. 215-220.

9. Matsiborko V.V., Matsiborko M.A., Beresnev A.L. Sbornik nauchnykh statej, posvyashchennykh problemam filologicheskikh, pedagogicheskikh, istoricheskikh, yuridicheskikh, sotsial'no-ekonomicheskikh, estestvennykh, inzhenerno-tekhnicheskikh nauk. KGU, Elista, 2015. pp. 573-576.

10. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling at all. Numerical recipes in C. The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 2-nd edition, ISBN 0-521-43 108-5, 2002. 965 p.