

Таблица

Остаточная масса целлюлозы при нагреве
и изотермической выдержке

Температура, °С		250	300	350	400	450
Остаточная масса образца, %, в среде	воздуха	74,92	13,13	5,44	1,98	0,62
	азота	93,34	10,78	5,56	4,58	3,62

Целлюлоза разлагается по двум разным механизмам в разных диапазонах температур и средах. Можно заметить, что при 300 °С коксовый остаток целлюлозы при термообработке в воздушной среде больше, чем в инертной. Это говорит о том, что при данной температуре молекулярные связи углерода и кислорода наиболее слабые и разрушаются в первую очередь. При этом отщепленный кислород начинает взаимодействовать в инертной среде, таким образом, осуществляется термическое разложение коксового остатка. В воздушной среде данные молекулы кислорода оказывают лимитирующий эффект на процесс термического разложения древесины, поэтому и остаточное содержание коксового остатка в воздушной среде выше, чем в инертной. При более высоких температурах – 350 °С и выше – процесс стабилизируется и протекает по обычному механизму. Поэтому можно сделать вывод, что целлюлоза разлагается при низких температурах по одному механизму, а при высоких температурах происходит смена механизма разложения целлюлозы.

Выводы

Результаты изотермической термогравиметрии при 300 °С могут быть использованы для определения кинетических параметров: энергии активации и предэкспоненциального фактора. При других температурах 200, 350, 400 и 450 °С не так отчетливо видна убыль массы образцов с течением времени. Тем-

пература 200 °С является слишком низкой для термического разложения древесины, и оно практически отсутствует. При температурах 400 и 450 °С основные процессы термического разложения органической массы ели происходят при нагреве образцов, даже при скорости 200 °С/мин.

Результаты экспериментов показали, что в процессе торрефикации еловой древесины при температуре 300 °С, прежде всего, происходит терморазложение гемицеллюлозы и лигнина, при этом для получения биоугля с удельной теплотой сгорания 24,72 МДж/кг и выходом около 70 % от массы воздушно сухого сырья время изотермической выдержки должно составлять 50 мин. При снижении температурного уровня до 270 °С для получения биоугля с аналогичной теплотой сгорания и массовым выходом потребуется изотермическая выдержка 150 мин., что значительно снизит производительность реактора.

References

1. Jankovich Z.B., Jankovich M.M. Pyrolysis of pine and beech wood samples under isothermal experimental conditions. The determination of kinetic triplets *Cell Chem Technol*, 2013, Vol. 47, pp. 681–697.
2. Jankovich Z.B. The pyrolysis process of wood biomass samples under isothermal experimental conditions – energy density considerations: application of the distributed apparent activation energy model with a mixture of distribution functions *Cell*, 2014, Vol. 21, pp. 2285–2314.
3. Orfao J.J.M., Antunes F.J.A., Figueiredo J.L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model *Fuel*, 1999, Vol. 78, pp. 349–358.
4. Ra H.W. et al. Devolatilization characteristics of high volatile coal in a wire mesh reactor *J Chem Eng*, 2014, Vol. 31, pp. 1570–1576.
5. Trubetskaya A. et al. Influence of fast pyrolysis conditions on yield and structural transformation of biomass chars *Fuel Proc Techn*, 2015, Vol. 140, pp. 205–214.
6. URL: <http://www.tainstruments.com/product.aspx?siteid=11&id=20&n=1>

УДК 621.311

Л.А. Семенова, Н.Г. Семенова
Оренбургский государственный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО В-СПЛАЙНА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Предложен новый алгоритм эмпирической модовой декомпозиции нелинейных сигналов, регистрируемых в электро-энергетических системах, посредством В-сплайн разложения. Представлена математическая модель определения среднего В-сплайна с описанием каждой из процедур: адаптивно-логической коррекции экстремумов; определения вершин В-сплайна; формирования воображаемых вершин; определения средней линии на основе В-сплайн-базиса; интерполяции среднего В-сплайна.

Нелинейный сигнал, эмпирическая модовая декомпозиция, В-сплайн разложение.

A new algorithm of empirical mode decomposition of non-linear signals recorded in electric power systems by B-spline decomposition is suggested. A mathematical model of the average B-spline determining with the each procedure description (adaptive-logical correction of extremum; determining of the B-spline vertices; forming imaginary vertices; determining of the average line on the B-spline basis; interpolation of the average B-spline) is presented.

Введение

Создание и развитие крупных энергообъединений на уровне национальных и транснациональных энергосистем (ЭС) приводит к тому, что ЭС приобретает новые свойства, которые проявляются и в возникновении общесистемных колебаний ее режимных параметров. Для анализа таких регистрируемых нелинейных процессов в энергосистемах нужны методы, способные обеспечить адекватную с определенной степенью точности их идентификацию и по частоте, и по времени, и по амплитуде. Это требуется для выявления и локализации низко- и высокочастотных составляющих, с целью выбора необходимого управляющего воздействия на ЭС. Так как режимное и противоаварийное управление ЭС происходит в режиме on-line, то одним из основных требований к методам спектрально-временного анализа регистрируемых нелинейных процессов является быстрдействие получения результата.

Основная часть

Сравнительный анализ применяемых в настоящее время методов спектрально-временного анализа [1] выявил, что наиболее достоверным при исследовании нелинейных и нестационарных процессов, протекающих в электроэнергетических системах, является эмпирический метод декомпозиции EMD. Сущность метода EMD [6] заключается в итерационной последовательности вычисления эмпирических мод $c_j(t)$ и остатков $r_j(t) = r_{j-1}(t) - c_j(t)$, где $j = 1, 2, \dots, n$ при $r_0 = x(t)$. В результате чего исследуемый нелинейный сигнал может быть представлен в виде суммы модовых функций $c_j(t)$ и конечного остатка $r_n(t)$:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – анализируемый нелинейный сигнал; n – количество эмпирических мод, которое определяется в ходе вычислений.

В настоящее время классический алгоритм EMD с применением кубических аппроксимирующих функций, как отмечено в [6], включает в себя следующие этапы:

- 1) идентификация экстремумов $u_{\max}$ и $u_{\min}$ сигнала $x(t)$;
- 2) построение огибающих: верхней, аппроксимирующей локальные максимумы ($u_{\max}(t)$) и нижней, аппроксимирующей локальные минимумы ($u_{\min}(t)$);
- 3) определение средней $m(t)$ в каждый момент времени между огибающими $m(t) = \frac{u_{\max}(t) + u_{\min}(t)}{2}$;
- 4) извлечение мод $c(t) = x(t) - m(t)$;
- 5) повтор этапов 1-4 к $r(t) = x(t) - c(t)$;

6) проверка на завершение итерационного процесса.

В случае наличия погрешностей (измерительные, инструментальные, случайные) в регистрируемом сигнале, при использовании классического алгоритма EMD с применением кубических аппроксимирующих функций, они будут включены (перенесены) в выделяемые модовые функции $c_j(t)$. Поскольку модовая декомпозиция носит итерационный характер, следовательно, ошибки разложения будут рекурсивно накапливаться. Нивелирование погрешностей, в том числе осцилляций модовых функций, как отмечено в работе [2], целесообразно осуществлять применением B -сплайна, который формирует кривую сглаженной формы, не проходящую через узловые точки [4]. В связи с этим для повышения эффективности спектрально-временного анализа процессов, протекающих в электроэнергетических системах, авторами предложен новый алгоритм, отличающийся от классического следующим:

- использованием кубической B -сплайновой аппроксимации для построения средней $b_m(t)$;

- уменьшением количества этапов алгоритма.

В данной работе рассмотрено определение среднего B -сплайна $b_m(t)$ для нелинейного сигнала. С целью выявления связи локальных экстремумов и средних значений в процессе отсеивания мод, в соответствии с рекомендациями в [5], предложены следующие процедуры:

- адаптивно-логическая коррекция экстремумов на концах исходного сигнала;
- определение вершин сплайна;
- формирование воображаемых вершин сплайна;
- определение средней линии на основе B -сплайн-базиса;
- интерполяция среднего B -сплайна.

Необходимость проведения *первой процедуры* обусловлена тем, что в большинстве случаев «края» исходного сигнала не содержат экстремумов, что вносит неопределенность при построении средней линии, которая, в свою очередь, влияет на корректность выделения эмпирических мод. Сущность адаптивно-логической коррекции заключается в анализе поведения сигнала в начальный и конечный моменты времени исследования [3]. Возможны две ситуации.

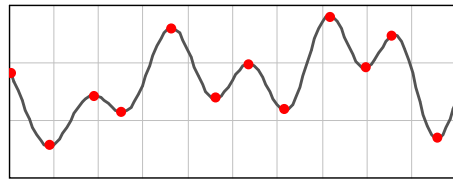
Первая ситуация: по краям сигнал увеличивается или уменьшается без зафиксированных экстремумов (начальная точка сигнала на рис. 1а и конечная точка сигнала на рис. 1б). В этом случае крайним точкам сигнала присваивается статус экстремума, выраженные (2), (3):

- для начальной точки: если $Y_{S_0} > Y_{ext_0}$ и $Y_{S_0} \geq Y_{ext_1}$ или $Y_{S_0} < Y_{ext_0}$ и $Y_{S_0} \leq Y_{ext_1}$, то:

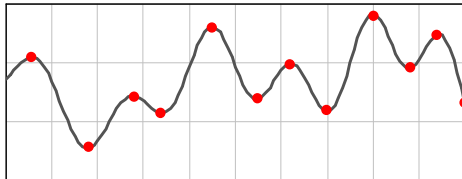
$$X_{ext-1} = X_0, \quad Y_{ext-1} = Y_0; \quad (2)$$

– для последней точки: если $Y_{S_p} > Y_{ext_n}$ и $Y_{S_p} \geq Y_{ext_{n-1}}$ или $Y_{S_p} < Y_{ext_n}$ и $Y_{S_p} \leq Y_{ext_{n-1}}$, то:

$$X_{ext_{n+1}} = X_{S_p}, \quad Y_{ext_{n+1}} = Y_{S_p}. \quad (3)$$



а)



б)

Рис. 1. Примеры адаптивно-логической коррекции экстремумов

Вторая ситуация: крайние точки сигнала располагаются между двумя крайними локализованными экстремумами (конечная точка сигнала на рис. 1а и начальная точка сигнала на рис. 1б):

– для начальной точки: если $Y_{S_0} > Y_{ext_0}$ и $Y_{S_0} < Y_{ext_1}$ или $Y_{S_0} < Y_{ext_1}$ и $Y_{S_0} > Y_{ext_1}$;

– для последней точки: если $Y_{S_p} > Y_{ext_n}$ и $Y_{S_p} < Y_{ext_{n-1}}$ или $Y_{S_p} < Y_{ext_n}$ и $Y_{S_p} > Y_{ext_{n-1}}$.

В этих случаях коррекция экстремумов не производится.

Вторая процедура определения среднего B -сплайна $b_m(t)$ заключается в определении $\lambda_{j,k}$ – вершин сплайна k -го порядка, которые могут быть вычислены по координатам локализованных экстремумов ($ext_j : j \in Z$):

$$\lambda_{j,k} = \frac{1}{2^{k-2}} \sum_{l=0}^{k-2} \binom{k-2}{l} \cdot ext_{j+l}. \quad (4)$$

Выражение (4) – биномиальное среднее значение экстремума, которое для кубического сплайна ($k = 4$) принимает вид:

$$\lambda_{j,4} = \frac{1}{4} [ext_{j+1} + 2 \cdot ext_{j+2} + ext_{j+3}]. \quad (5)$$

Определить биномиальные средние значения экстремумов непосредственно в крайних точках исследуемого сигнала невозможно, поскольку первая и последняя вершины, определенные по (5), будут располагаться в треугольниках $ext_0 ext_1 ext_2$ (рис. 2а) и $ext_{n-2} ext_{n-1} ext_n$ (рис. 2б) соответственно. Учитывая то, что λ_j используются для построения среднего

B -сплайна, принято допущение о совпадении положений λ_0 и λ_m с абсциссами крайних точек исследуемого сигнала, тогда ординаты вершин определяются как полусумма значений крайних экстремумов:

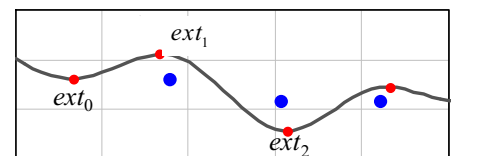
– для начальной вершины λ_0 (рис. 2в):

$$Y(\lambda_0) = \frac{Y_{ext_0} + Y_{ext_1}}{2}, \quad (6)$$

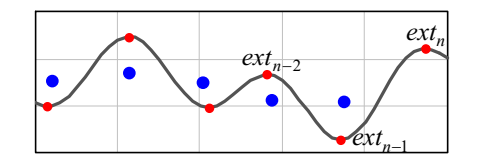
– для последней вершины λ_m (рис. 2г):

$$Y(\lambda_m) = \frac{Y_{ext_{n-1}} + Y_{ext_n}}{2}. \quad (7)$$

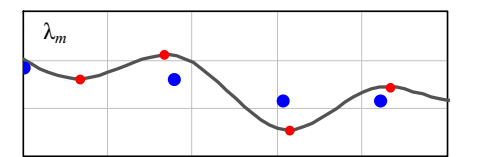
Формирование воображаемых вершин в **третьей процедуре** необходимо ввиду одного из основных свойств B -сплайновой кривой: ее форма однозначно задается координатами опорных вершин, но, как правило, кривая только приближается к опорным вершинам и может не проходить ни через одну из них.



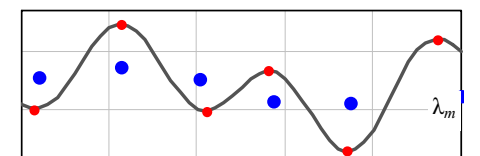
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Иллюстрация определения вершин сплайна на концах сигнала

С одной стороны, это свойство оказывается полезным, особенно когда исходные данные неравномерно распределены вдоль оси абсцисс, что влечет за собой появление «острых вершин» (биномиальных средних значений экстремумов), или исходные дан-

ные содержат в себе существенные погрешности, которые автоматически переносятся на средний B -сплайн. Сглаженную форму средней B -сплайновой кривой можно рассматривать как местоположение наиболее вероятных значений биномиальных средних экстремумов, определенных по выражениям (4)–(7).

С другой стороны, сформированный сплайн не проходит и через крайние вершины: его начало располагается в треугольнике $\lambda_0\lambda_1\lambda_2$ (рис. 3а), а конец – в треугольнике $\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m$ (рис. 3б), что обуславливает искажение (непредсказуемость) модовой функции на начальном и конечном интервалах.

Для исключения непредсказуемости выделения модовой функции можно воспользоваться вспомогательными, так называемыми, воображаемыми вершинами. Как отмечалось ранее, расположение начальной и конечной точек B -сплайна известно: это треугольники определяющего его массива биномиальных средних значений экстремумов $\lambda_0\lambda_1\lambda_2$ и $\lambda_{m-2}\lambda_{m-1}\lambda_m$ соответственно. Подбором вспомогательных вершин можно добиться того, чтобы начальная точка кубической B -сплайновой кривой располагалась ближе к вершине λ_0 и даже совпадала с ней. Аналогичных результатов можно добиться и для конечной точки.

Воображаемые вершины λ_{-1} и λ_{m+1} в дополнении к массиву $\lambda_0, \dots, \lambda_m$ определяются:

$$\lambda_{-1} = 2\lambda_0 - \lambda_1, \quad \lambda_{m+1} = 2\lambda_m - \lambda_{m-1}. \quad (8)$$

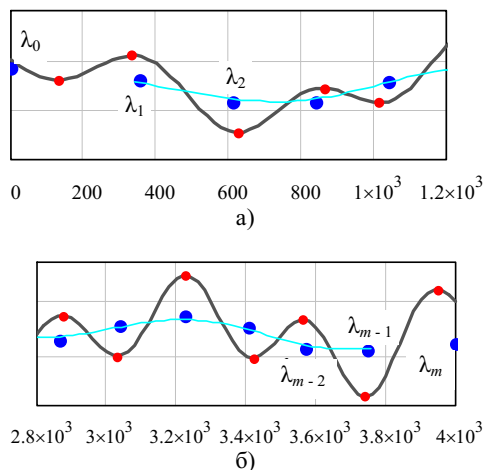


Рис. 3. Фрагменты среднего B -сплайна на начальном (а) и конечном (б) интервалах без вспомогательных вершин

Таким образом, кубический B -сплайн строится по новому массиву: $\lambda_{-1}, \lambda_0, \dots, \lambda_m, \lambda_{m+1}$, начинаясь в вершине λ_0 и заканчиваясь в вершине λ_m (рис. 4).

Четвертая процедура заключается в построении средней B -сплайновой кривой, которая на интервале $[\lambda_j, \lambda_{j+1}]$ представляет собой B -сплайн-базис k -го порядка, описываемый выражением [4]:

$$B_k(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \lambda_{j,k} \cdot N_{j,k}(t), \quad (9)$$

где $\lambda_{j,k}$ – вершины сплайна k -го порядка, определенные при выполнении первой процедуры; $N_{j,k}(t)$ – весовые множители j -ой B -сплайновой кривой порядка k .

Весовые множители выражения (9) определяются:

$$\begin{aligned} N_0(t) &= \frac{(1-t)^3}{6}; & N_2(t) &= \frac{-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1}{6}; \\ N_1(t) &= \frac{3t^3 - 6t^2 + 4}{6}; & N_3(t) &= \frac{t^3}{6}. \end{aligned} \quad (10)$$

Как правило, значения среднего B -сплайна будут определены в моменты времени, не совпадающие с регистрируемыми моментами времени исследуемого сигнала. Это несовпадение приводит к некорректному определению разности между исследуемым сигналом и средним B -сплайном при дальнейшем разложении исследуемого сигнала на эмпирические моды. В связи с этим в работе предложено ввести процедуру интерполяции, позволяющую определить значения среднего B -сплайна в моменты времени исследуемого сигнала.

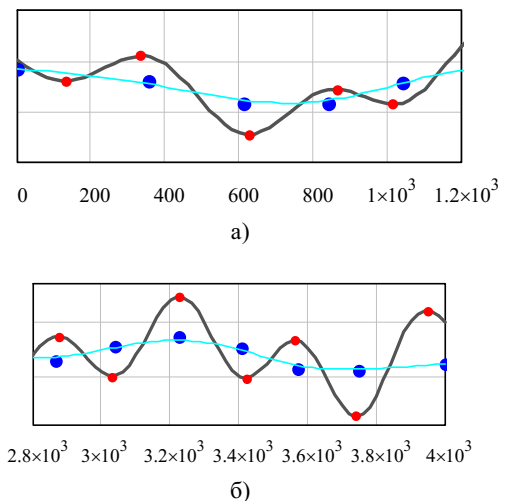


Рис. 4. Фрагменты среднего B -сплайна на начальном (а) и конечном (б) интервалах с учетом воображаемых вершин

При выполнении **пятой процедуры** в работе использована кусочно-линейная интерполяция, позволяющая на каждом интервале $[\lambda_i, \lambda_{i+1}]$ представить функцию в виде:

$$F(t) = k_i(t - \lambda_i) + f_i, \quad (11)$$

где $k_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i}$; t – регистрируемые моменты времени исследуемого сигнала, $\lambda_i \leq t \leq \lambda_{i+1}$; f_i – значение среднего B -сплайна в точке λ_i .

На рис. 5 приведены результаты построения среднего B -сплайна для нелинейного сигнала.

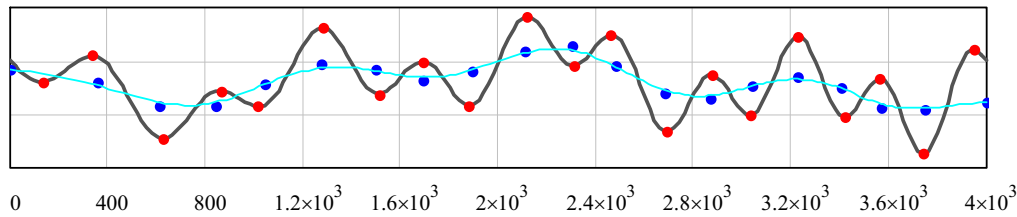


Рис. 5. Результаты построения среднего B -сплайна $b(t)$

Машинное время программной реализации алгоритма разложения сигнала на эмпирические моды с заданным значением среднеквадратичного отклонения реконструкции сигнала ($\sigma = 0,25$) с апробацией предложенной математической модели определения среднего B -сплайна $b_m(t)$ составила $t = 18,1$ с. Для сравнения: продолжительность работы программы по классическому алгоритму с тем же значением σ составляет $t = 34,4$ с.

Выводы:

1. Для идентификации регистрограмм электроэнергетических систем по частоте, времени, амплитуде целесообразно применять B -сплайн разложение нелинейного сигнала.
2. Разработана новая математическая модель определения среднего B -сплайна $b_m(t)$ при исследовании нелинейных сигналов, включающая следующие процедуры:
 - адаптивно-логическая коррекция экстремумов;
 - определение вершин B -сплайна;
 - формирование воображаемых вершин $b_m(t)$;
 - определение средней линии на основе B -сплайн-базиса;
 - интерполяция среднего B -сплайна $b_m(t)$.
3. Программная реализация алгоритма EMD (анализа нелинейных процессов электроэнергетических систем) посредством B -сплайн разложения повышает быстродействие получения результатов идентификации регистрограмм электроэнергетических систем в 1,9 раза по сравнению с классическим обобщенным алгоритмом EMD.

Литература

1. Бердин А.С., Семенова Л.А. Выбор метода частотно-временного анализа для анализа регистрируемых процессов в энергосистемах // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды Всероссийской научно-технической конференции (Оренбург, 23–25 октября 2012 г.). Оренбург, 2012. С. 132–137.
2. Бердин А.С. и др. Кубическая сплайновая интерполяция и аппроксимация для мониторинга переходных режимов в энергетических системах // Электроэнергетика глазами молодежи: Научные труды III Международной научно-технической конференции (Екатеринбург, 22–26 октября 2012 г.): в 2 т. Екатеринбург, 2012. Т. 1. С. 139–143.

3. Давыдов В.А., Давыдов А.В. Уменьшение краевых эффектов при выполнении эмпирической модовой декомпозиции сигналов преобразования Гильберта-Хуанга // Актуальные инновационные исследования: наука и практика. 2011. № 1. URL: <http://www.actualresearch.ru>

4. Шикин Е.В., Плис Л.И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М., 1996.

5. Chen Q., Huang N.E., Riemenschneider S., Xu Y. A B -spline approach for empirical mode decompositions. Advances in Computational Mathematics, 24(1-4):171–195, 2006.

6. Norden E. Huang., Samuel S.P. Shen The Hilbert-Huang transform and its applications World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck. Link, Singapore 596224.

References

1. Berdin A.S., Semenova L.A. Vyibor metoda chastotno-vremennogo analiza dlya analiza registriruemyykh protsessov v energosistemah [The choice of method of time-frequency analysis for analyzing the logged processes in power systems]. Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy: Trudy Vserossiyskoi nauchno-tehnicheskoi konferencii [Energy: state, problems, perspectives: Proceedings of Russian scientific-technical conference] (Orenburg, 23–25 october 2012). Orenburg, 2012, pp. 132–137.

2. Berdin A.S. et al. Kubicheskaya splaynovaya interpolatsiya i approksimatsiya dlya monitoringa perehodnykh rezhimov v energeticheskikh sistemah [Cubic spline interpolation and approximation for monitoring transients in power systems]. Elektroenergetika glazami molodezhi: nauchnyye trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Ekaterinburg, 22–26 oktyabrya 2012 g.): v 2 t. [The electric power industry through the eyes of youth: scientific papers III International scientific and technical conference (Ekaterinburg, Russia, 22–26 October 2012): in 2 volumes]. Ekaterinburg, 2012. T. 1, pp. 139–143.

3. Davydov V.A., Davydov A.V. Umen'shenie kraevykh ehffektov pri vypolnenii ehmpiricheskoi modovoi dekompozitsii signalov preobrazovaniya Gilberta-Huanga [Reducing edge effects when performing empirical mode decomposition of signals transformations of the Hilbert-Huang] Aktualnye innovatsionnye issledovaniya: nauka i praktika [Current innovation research: science and practice], 2011, № 1. URL: <http://www.actualresearch.ru>

4. Shikin E.V., Plis L.I. Krivye i poverhnosti na ekrane kompyutera. Rukovodstvo po splaynam dlya polzovatelei [Curves and surfaces on the computer screen. Manual on splines for the user]. Moscow, 1996.

5. Chen Q., Huang N.E., Riemenschneider S., Xu Y. A B -spline approach for empirical mode decompositions. Advances in Computational Mathematics, 24(1-4):171–195, 2006.

6. Norden E. Huang., Samuel S.P. Shen The Hilbert-Huang transform and its applications World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck. Link, Singapore 596224.