

УДК 621.317.33

АППРОКСИМАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ СЛУЧАЙНОЙ ПОМЕХИ

П.К. Ланге, Е.Е. Ярославкина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассмотрены вопросы оперативного измерения интенсивности одиночного импульса, а также определения его аппроксимационной модели. В качестве импульса выбрана огибающая радиолокационного импульса, а также пик сигнала аналитического прибора. В качестве меры интенсивности выбрана площадь, а также дисперсия импульса. Для решения поставленной задачи используется сплайн-аппроксимация дискретных значений импульсного сигнала. Определена погрешность сплайн-аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала, а также погрешность аппроксимации при наличии случайной помехи. Показано, что использование сплайн-аппроксимации снижает влияние случайной помехи. Определены характеристики предложенного метода при использовании параболической, а также кубической сплайн-аппроксимации. Приведен анализ погрешности рассмотренного метода, вызванной наличием случайной аддитивной помехи. Определены характеристики рассмотренного метода при анализе гауссового сигнала. Определена зависимость погрешности рассмотренного метода от интенсивности случайной помехи. Исследование проведено для равномерного закона распределения случайной помехи. Описана структура системы, реализующей описанный метод сплайн-аппроксимации дискретных значений сигнала. Предложено использовать рассмотренный аппроксимационный метод измерения интенсивности импульсного гауссового сигнала при решении задач обнаружения сигнала на фоне помех, а также его определения его границ. Предложено использовать описанные методы при необходимости оперативного определения эффективного значения периодического негармонического сигнала (за время не более половины его периода) путем определения дисперсии его одной полуволны. Предложено также использовать описанные методы для определения информативных параметров импульсного сигнала (его положения начала, конца, амплитуды).

Ключевые слова: дисперсия сигнала, аппроксимация, случайная помеха, дискретизация, мгновенное значение, сплайн, импульсный сигнал.

Введение

Импульсные сигналы используются при измерениях информационных параметров различных процессов во многих прикладных задачах. Такими характерными задачами являются радиолокация и гидролокация, хроматографические и спектрометрические системы анализа состава различных веществ, импульсные системы дефектоскопии, а также системы определения параметров потока жидкости и газа. В большинстве случаев при решении этих задач необходимо распо-

Ланге Петр Константинович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

Ярославкина Екатерина Евгеньевна (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

знать импульсный сигнал на фоне случайной помехи, определить его интенсивность, а также форму и основные параметры (амплитуду, ее положение на оси времени, моменты начала и конца импульса).

Такая же задача возникает и при оперативном управлении, а также обнаружении аварийной ситуации мощного электрооборудования, при которой необходимо оперативно определить параметры периодического негармонического сигнала в течение времени не более его полупериода.

В приложениях к радиолокации и гидролокации обычно считается, что импульсный сигнал имеет гауссову форму, и ставится задача его распознавания на фоне случайных помех [1]. Для определения информационных характеристик импульсного сигнала используются различные методы его аппроксимации, например сверткой двух треугольных импульсов [2].

В электротехнических приложениях наиболее надежным методом, используемым при решении задачи управления силовым электрооборудованием, является оперативное измерение таких интегральных характеристик, как эффективное значение напряжения и тока в цепях мощного электрооборудования, а также активная и реактивная мощности [3–4]. Аналогичные задачи необходимо решать и при управлении мощными нетрадиционными источниками электроэнергии, а также электроприводами гибридных транспортных средств [5].

Для оперативного определения аварийных и предаварийных режимов работы силового электрооборудования требуется высокое быстродействие и точность измерения интегральных характеристик периодического сигнала. При этом особое значение имеют задачи измерения эффективного значения тока и напряжения в силовых цепях мощных электроустановок [6–8].

В измерительных системах с использованием цифровых сигнальных процессоров прямое измерение может быть реализовано путем использования дискретных значений сигнала на количестве интервалов дискретизации, кратном периоду его первой гармоники. Недостатком такого метода является значительная погрешность при изменении основной частоты сигнала, в результате чего интервал дискретизации может не быть кратным ее периоду. К тому же при использовании цифровых методов при небольшом числе дискретных значений сигнала (порядка 6...10), а также при присутствии аддитивной случайной помехи погрешность определения эффективного значения сигнала может достигать значительной величины [9–12].

Сигналы, формируемые аналитическим измерительным прибором (в виде хроматограммы, спектрограммы), также обычно представляют собой последовательность импульсов определенной формы. В ряде случаев можно считать, что такие импульсы имеют гауссову форму, в других случаях они имеют более сложный вид. При аппроксимации этих импульсов определенными функциями может быть решена задача коррекции аппаратной функции инерционного детектора аналитического прибора [13]. При обработке таких сигналов необходимо определить их информационные характеристики: положение начала, конца и амплитуды импульса на оси независимого переменного (времени, длины волны и т. д.) и интенсивность (площадь импульса, дисперсию или среднееквадратичное значение).

Вышеописанные задачи усложняются в ситуациях наличия аддитивной случайной помехи.

В связи с тем, что в большинстве современных систем осуществляется аналого-цифровое преобразование сигнала, для решения вышеперечисленных задач

необходимо использовать методы аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала на интервале его существования.

Постановка задачи

С целью снижения погрешности, вызванной наличием аддитивной случайной помехи, предлагается использовать аппроксимационный метод, сглаживающий влияние наложенной на анализируемый сигнал случайной помехи.

Аппроксимационный метод определения эффективного значения импульсного сигнала гауссового вида при отсутствии аддитивной случайной помехи

Рассмотрим метод определения интенсивности (в виде дисперсии) импульсного сигнала гауссового вида с использованием его сплайн-аппроксимации. На практике дисперсия сигнала обычно определяется по его временной реализации $x_c(t)$.

В идеальном случае дисперсия y_d сигнала x_c равна

$$y_d^{ideal} = \int_0^T x_c^2 dt, \quad (1)$$

где T – интервал существования импульсного сигнала.

Рассмотрим задачу определения дисперсии импульсного сигнала по его дискретным значениям.

Внутри интервалов дискретизации сигнал может быть восстановлен с определенной погрешностью аппроксимирующей функцией. В этом случае для определения эффективного значения могут быть использованы коэффициенты аппроксимирующей функции.

При решении описанной задачи в такой постановке используются различные аппроксимации. В [14] применяются методы цифрового гармонического анализа многокомпонентных случайных сигналов, в [15] описаны системы для оценки амплитудного спектра многокомпонентных случайных сигналов.

Перспективным представляется использование «гладких» сплайн-функций для аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала внутри интервала его существования [16, 19], в которых используются кубические сплайны для аппроксимации зашумленных данных. Однако на практике целесообразно использовать аппроксимацию дискретных значений не как самоцель, а как средство для определения информационных параметров импульсного сигнала (например таких, как площадь импульса, его дисперсия).

Рассмотрим использование для этой цели параболической сплайн-функции, которая на n -м интервале дискретизации описывается выражением

$$x_{parab}(t) = a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n], \quad (2)$$

где $a_2[n]$, $a_1[n]$, $a_0[n]$ – постоянные коэффициенты для n -го интервала.

Коэффициенты $a_2[n]$, $a_1[n]$, $a_0[n]$ определяются по соответствующим выражениям для одного из цифровых сплайн-фильтров. Например, для пятиточечного параболического сплайн-фильтра эти выражения определяются соотношениями [13, 18]

$$\begin{aligned}
a_0[n] &= \frac{1}{16}(-x_c[n-2] + 4x_c[n-1] + 10x_c[n] + 4x_c[n+1] - x_c[n+2]), \\
a_1[n] &= \frac{1}{8t_d}(x_c[n-2] - 6x_c[n-1] + 6x_c[n+1] - x_c[n+2]), \\
a_2[n] &= \frac{1}{16t_d^2}(-x_c[n-2] + 7x_c[n-1] - 6x_c[n] - 6x_c[n+1] + \\
&\quad + 7x_c[n+2] - x_c[n+3]).
\end{aligned} \tag{3}$$

При использовании коэффициентов (3) сплайн-аппроксимация $X_{parab}(t)$ дискретных значений сигнала определяется выражением

$$X_{parab}(t) = \sum_{m=2}^{n+4} \begin{cases} a_2[n](t - nt_d)^2 + a_1[n](t - nt_d) + a_0[n] & \text{if } nt_d < t \leq (n+1)t_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \tag{4}$$

Параболическая сплайн-функция, как известно, не имеет разрывов на границах участков дискретизации по 0-й и 1-й производным, поэтому использование аппроксимирующих сплайнов практически не вызывает появления высших гармоник в спектре сигнала, восстановленного с помощью такой аппроксимации. Кроме того, цифровой фильтр, реализующий аппроксимационный алгоритм, обладает свойством сглаживания сигнала, на который наложена аддитивная помеха [19].

Первый начальный момент параболической сплайн-функции, аппроксимирующий сигнал на одном интервале дискретизации, определяется выражением

$$m_{d\ parab} = \int_0^{t_d} (a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n]) dt = t_d \left(a_2[n] \frac{t_d^2}{3} + a_1[n] \frac{t_d}{2} + a_0^2[n] \right). \tag{5}$$

Если параболическая сплайн-аппроксимация импульсного сигнала на его периоде существования определена на m дискретных участках, то ее первый начальный момент равен

$$M_{parab} = t_d \left[\sum_{n=1}^{m-2} \frac{1}{3} a_2^2[n] \cdot t_d^2 + \frac{1}{2} a_1[n] \cdot t_d + \frac{1}{3} a_0^2[n] \right]. \tag{6}$$

Выражение для второго начального момента сплайн-функции (то есть ее дисперсии) на одном интервале дискретизации имеет вид

$$\begin{aligned}
d_{d\ parab}[n] &= \int_0^{t_d} (a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n])^2 dt = t_d \left(a_2[n] \frac{t_d^4}{5} + a_2[n] a_1[n] \frac{t_d^3}{2} + \right. \\
&\quad \left. a_1^2[n] \frac{t_d^2}{3} + a_0[n] a_2[n] \frac{2t_d^2}{3} + a_0[n] a_1[n] t_d + a_0^2[n] \right).
\end{aligned} \tag{7}$$

Если параболическая сплайн-аппроксимация импульсного сигнала на его периоде существования определена на m дискретных участках, то при интервале дискретизации t_d сигнала его дисперсия определяется выражением

$$D_{parab} = t_d \left[\sum_{n=1}^m \frac{1}{5} a_2^2 [n] \cdot t_d^4 + \frac{1}{2} a_1 [n] a_2 [n] \cdot t_d^3 + \frac{1}{3} a_1^2 [n] \cdot t_d^2 + \frac{2}{3} a_0 [n] a_2 [n] \cdot t_d^2 + a_0 [n] a_1 [n] \cdot t_d + a_0^2 [n] \right]. \quad (8)$$

Отсюда можно при необходимости определить среднеквадратичное значение импульсного сигнала:

$$y_{rms spl} = \sqrt{D_{parab}}.$$

Как видно из выражений (3), для определения коэффициентов сплайн-аппроксимации сигнала x_c на интервале его существования необходимо использовать два дополнительных дискретных участка слева от интервала аппроксимации (на половине периода сигнала), а также два дополнительных дискретных участка справа от интервала аппроксимации.

Таким образом, сплайн-аппроксимация дискретных значений сигнала определяется на интервале $[2t_d, (T+2t_d)]$.

Для определения дисперсии сигнала в течение времени его существования необходимо реализовать выражения (3), (5) и (6) с помощью микропроцессорного контроллера.

Рассмотрим использование для этой цели кубической сплайн-функции, которая на n -м интервале дискретизации описывается выражением

$$x_{cub}(t) = a_3 [n] t^3 + a_2 [n] t^2 + a_1 [n] t + a_0 [n], \quad (9)$$

где $a_3[n]$, $a_2[n]$, $a_1[n]$, $a_0[n]$ – постоянные коэффициенты для n -го интервала.

Коэффициенты $a_3 [n]$, $a_2 [n]$, $a_1 [n]$, $a_0 [n]$ определяются по соответствующим выражениям для одного из цифровых сплайн-фильтров. Например, для пятиточечного кубического сплайн-фильтра эти выражения определяются соотношениями [13, 18]

$$\left. \begin{aligned} a_0 [n] &= \frac{1}{36} (-x_c [n-2] + 4x_c [n-1] + 10x_c [n] + 4x_c [n+1] - x_c [n+2]), \\ a_1 [n] &= \frac{1}{12t_d} (x_c [n-2] - 8x_c [n-1] + 8x_c [n+1] - x_c [n+2]), \\ a_2 [n] &= \frac{1}{12t_d^2} (-x_c [n-2] + 10x_c [n-1] - 18x_c [n] + 10x_c [n+1] - x_c [n+2]), \\ a_3 [n] &= \frac{1}{36t_d^3} (x_c [n-2] - 11x_c [n-1] + 28x_c [n] - 28x_c [n+1] + \\ &\quad + 11x_c [n+2] - x_c [n+3]). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При использовании коэффициентов (10) кубическая сплайн-аппроксимация $X_{cub}(t)$ дискретных значений сигнала определяется выражением

$$X_{cub}(t) = \sum_{m=2}^{n+4} \left[\begin{array}{ll} K [n] & \text{if } nt_d < t \leq (n+1)t_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{array} \right], \quad (11)$$

где $K[n] = a_3[n](t - nt_d)^3 + a_2[n](t - nt_d)^2 + a_1[n](t - nt_d) + a_0[n]$.

Первый начальный момент кубической сплайн-функции, аппроксимирующий сигнал на одном интервале дискретизации, определяется выражением

$$m_{d\text{ cub}} = \int_0^{t_d} (a_3[n]t^3 + a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n]) dt =$$

$$= t_d \left(a_3[n] \frac{t_d^3}{4} + a_2[n] \frac{t_d^2}{3} + a_1[n] \frac{t_d}{2} + a_0^2[n] \right). \quad (12)$$

Если кубическая сплайн-аппроксимация импульсного сигнала на его периоде существования определена на m дискретных участках, то ее первый начальный момент равен

$$M_{\text{ cub}} = t_d \left[\sum_{n=1}^{m-2} \frac{1}{4} a_3[n] \cdot t_d^3 + \frac{1}{3} a_2[n] \cdot t_d^2 + \frac{1}{2} a_1[n] \cdot t_d + a_0[n] \right]. \quad (13)$$

Выражение для второго начального момента кубической сплайн-функции (то есть ее дисперсии) на одном интервале дискретизации определяется выражением

$$d_{\text{ cub}}[n] = \int_0^{t_d} (a_3[n]t^3 + a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n])^2 dt.$$

После преобразований это выражение принимает вид

$$d_{\text{ cub}}[n] = t_d \left((a_3[n])^2 \frac{t_d^6}{7} + a_2[n]a_3[n] \frac{t_d^5}{3} + 2a_1[n]a_3[n] \frac{t_d^4}{5} + (a_2[n])^2 \frac{t_d^4}{5} + a_0[n]a_3[n] \frac{t_d^3}{2} + \right.$$

$$\left. + a_1[n]a_2[n] \frac{t_d^3}{2} + 2a_0[n]a_2[n] \frac{t_d^2}{3} + (a_1[n])^2 \frac{t_d^2}{3} + a_0[n]a_1[n]t_d + (a_0[n])^2 \right). \quad (14)$$

Если кубическая сплайн-аппроксимация импульсного сигнала на его периоде существования определена на m дискретных участках, то при интервале дискретизации t_d сигнала его дисперсия определяется выражением

$$D_{\text{ cub}} = \sum_{n=1}^m \alpha_{2d\text{ cub}}[n]. \quad (15)$$

Анализ характеристик рассмотренного метода при отсутствии случайной помехи

В качестве примера рассмотрим задачу определения дисперсии сигнала единичной амплитуды гауссовой формы

$$x_c(t) = \exp \left[- \frac{(t-7)^2}{3} \right], \quad (16)$$

представленного 12-ю дискретными отсчетами.

График такого сигнала приведен на рис. 1.

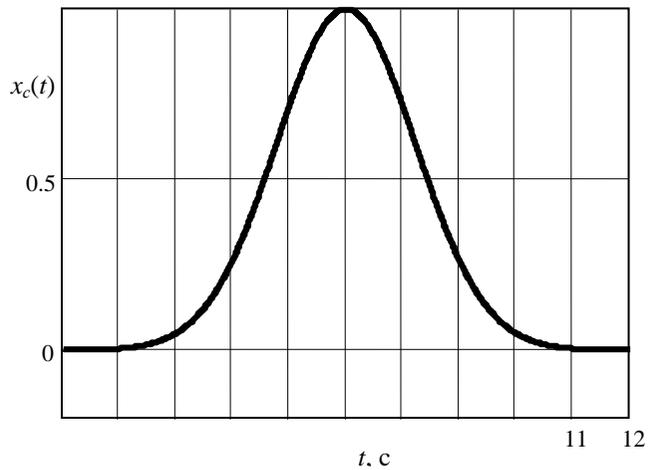


Рис. 1. График импульсного сигнала гауссовой формы

Графики параболической и кубической сплайн-аппроксимаций дискретных значений импульсного сигнала, построенные с использованием выражений (4) и (11), представлены на рис. 2.

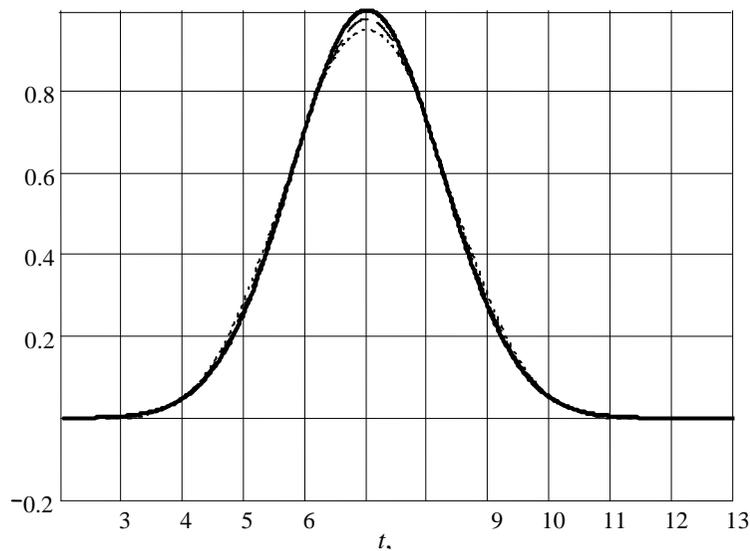


Рис. 2. Графики параболической X_{parab} и кубической X_{cub} сплайн-аппроксимаций сигнала $x_c(t)$:

- сигнал $x_c(t)$;
- аппроксимация X_{parab} ;
- аппроксимация X_{cub}

Зависимости погрешностей аппроксимации импульсного сигнала параболическим и кубическим сплайном приведены на рис. 3.

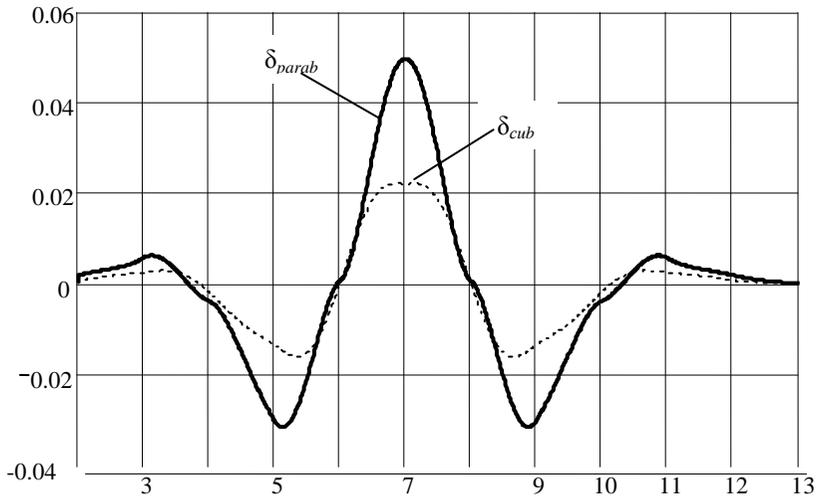


Рис. 3. Зависимости погрешности аппроксимации импульсного сигнала параболическим и кубическим сплайнами (δ_{parab} и δ_{cub} соответственно)

Как видно из рассмотрения этих графиков, примерно при 10 дискретных отсчетов выбранного импульсного сигнала погрешность аппроксимации параболическим сплайном не превышает 5 %, а кубическим – 2 %.

При необходимости сплайн-аппроксимация дискретных значений импульсного сигнала может быть восстановлена в непрерывном виде с помощью структур на базе интеграторов, масштабирующих усилителей, аналогового регистра сдвига [20].

Рассмотрим возможность определения моментов 1-го и 2-го порядков импульсного сигнала (16).

Истинное значение момента 1-го порядка импульсного сигнала, то есть его площадь, определяется выражением

$$M_{ideal} = \int_0^{13} x_c(t) dt = 3,07. \quad (17)$$

Истинное значение момента 2-го порядка импульсного сигнала, то есть его дисперсия, определяется выражением

$$D_{ideal} = \int_0^{13} x_c^2(t) dt = 2,171. \quad (18)$$

При использовании параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала (11) его момент 1-го порядка определяется выражением (6) и равен

$$M_{parab} = 3,071,$$

а его дисперсия, определяемая (8), равна

$$D_{parab} = 2,111. \quad (19)$$

Погрешности определения моментов импульсного сигнала M_1 и D_2 при параболической сплайн-аппроксимации его дискретных значений определяются выражениями

$$\delta M_{parab} = \frac{M_{ideal} - M_{parab}}{M_{ideal}} \cdot 100\%, \quad \delta D_{parab} = \frac{D_{ideal} - D_{parab}}{D_{ideal}} \cdot 100\% \quad (20)$$

и равны соответственно

$$\delta M_{parab} = 0,03\%, \quad \delta D_{parab} = 2,7\%. \quad (21)$$

При использовании кубической сплайн-аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала (11) его момент 1-го порядка определяется выражением (13) и равен

$$M_{cub} = 3,071,$$

а его дисперсия, определяемая (15), равна

$$D_{cub} = 2,111.$$

Погрешности определения моментов импульсного сигнала M_1 и D_2 при кубической сплайн-аппроксимации его дискретных значений определяются выражениями, аналогичными (20), и равны

$$\delta M_{cub} = 0,013\%, \quad \delta D_{cub} = 1,5\%. \quad (22)$$

Анализ характеристик рассмотренного метода при наличии случайной помехи

Рассмотрим задачу определения дисперсии сигнала (16) единичной амплитуды гауссовой формы при наличии случайной помехи с размахом 0,1, имеющей равномерный закон распределения. График такого сигнала представлен на рис. 4.

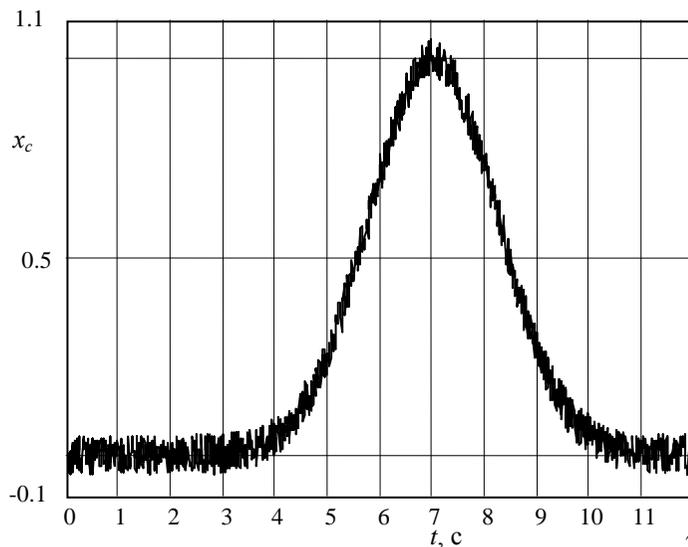


Рис. 4. Импульсный сигнал гауссовой формы с помехой

Так же как и в предыдущем примере, сигнал представлен 12 дискретными отсчетами с наложенной на них аддитивной случайной помехой. Графики параболической и кубической сплайн-аппроксимации такого сигнала представлены на рис. 5.

Графики погрешностей сплайн-аппроксимации сигнала с помехой представлены на рис. 6.

Как видно из рассмотрения рис. 3 и рис. 6, несмотря на значительную помеху погрешности сплайн-аппроксимации сигнала увеличились незначительно.

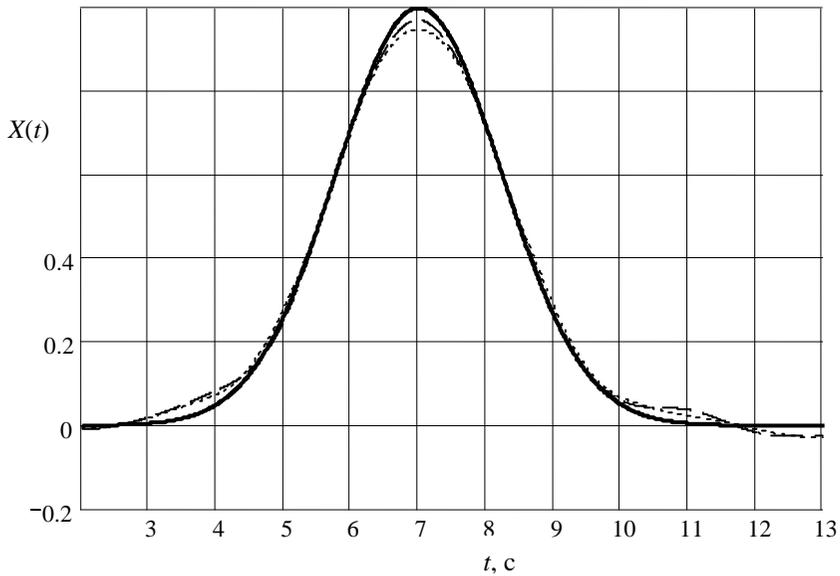


Рис. 5. Графики параболической X_{parab} и кубической X_{cub} сплайн-аппроксимаций сигнала $x(t)$ с аддитивной случайной помехой:

- сигнал $x(t)$;
- аппроксимация X_{parab} ;
- аппроксимация X_{cub}

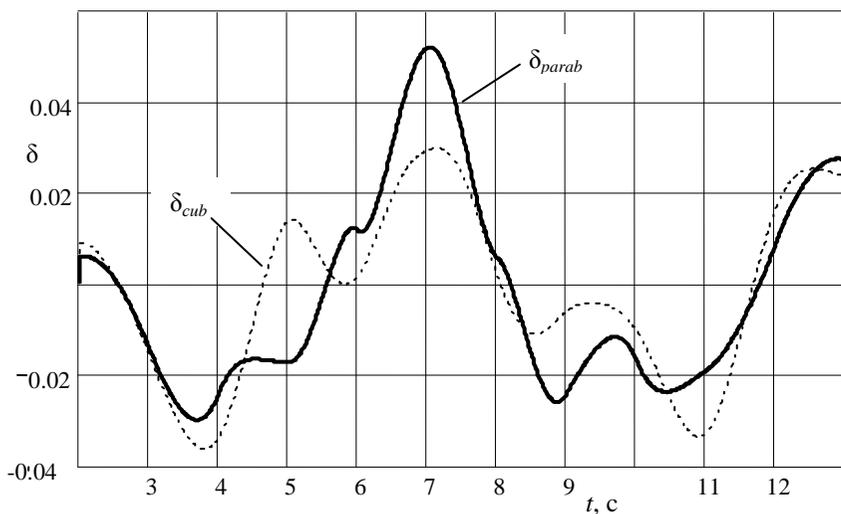


Рис. 6. Зависимости погрешности аппроксимации импульсного сигнала с помехой параболическим и кубическим сплайнами (δ_{parab} и δ_{cub} соответственно)

При использовании параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала (11) с помехой его момент 1-го порядка определяется выражением (6) и равен

$$M_{\text{parab}} = 3,182,$$

а его дисперсия, определяемая (8), равна

$$D_{\text{parab}} = 2,147.$$

Погрешности определения моментов импульсного сигнала M_{parab} и D_{parab} при параболической сплайн-аппроксимации его дискретных значений определяются выражениями (20) и равны соответственно

$$\delta M_{\text{parab}} = 3,6\% , \quad \delta D_{\text{parab}} = 1,1\% . \quad (23)$$

При использовании кубической сплайн-аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала (11) его момент 1-го порядка определяется выражением (13) и равен

$$M_{\text{cub}} = 3,186,$$

а его дисперсия, определяемая (15), равна

$$D_{\text{cub}} = 2,17.$$

Погрешности определения моментов импульсного сигнала M_{cub} и D_{cub} при параболической сплайн-аппроксимации его дискретных значений с наложенной аддитивной случайной помехой определяются выражениями, аналогичными (20), и равны

$$\delta M_{\text{cub}} = 3,8\% , \quad \delta D_{\text{cub}} = 0,03\% . \quad (24)$$

Рассмотрим дополнительно характеристики прямого метода определения моментов M и D импульсного сигнала с наложенной на него аддитивной случайной помехой.

Они определяются выражениями

$$M_{\Sigma} = \sum_{n=1}^m x[n], \quad D_{\Sigma} = \sum_{n=1}^m x^2[n]. \quad (25)$$

Для данного примера эти значения равны

$$M_{\Sigma} = 3,24; \quad D_{\Sigma} = 2,21.$$

Погрешности определения моментов импульсного сигнала M_{cub} и D_{cub} с наложенной аддитивной случайной помехой при использовании выражений (25) равны

$$\delta M_{\Sigma} = 5,5\% , \quad \delta D_{\Sigma} = 1,7\% . \quad (26)$$

Выводы

1. Использование сплайн-аппроксимации дискретных значений импульсного сигнала гауссовой формы позволяет при достаточно небольшом числе отрез-

ков дискретизации (порядка 10) восстановить форму сигнала с достаточно малой погрешностью.

2. Сплайн-аппроксимация дискретных значений импульсного сигнала позволяет определить значения первого и второго начальных моментов (математическое ожидание и дисперсию) импульсного сигнала с небольшой погрешностью.

3. При наличии случайной аддитивной помехи сплайн-аппроксимация дискретных значений импульсного сигнала восстанавливает его форму с коррекцией помехи, что позволяет достаточно просто определить информационные параметры сигнала (положение начала, вершины, конца импульсного сигнала на оси независимого переменного).

4. Сравнивая погрешности (24), (25), (26) различных методов, можно сделать вывод, что при наличии случайной помехи прямой метод (25) определения моментов импульсного сигнала имеет значительно большую погрешность по сравнению с методами параболической и кубической сплайн-аппроксимации дискретных значений такого сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Harry L. Van Trees*. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part III. Radar – Sonar Signal Processing and Gaussian Signals in Noise. John Wiley and Sons. Inc. – New York. – 2001. – 626 p.
2. *Nicolae Dumitru Alexandria, Adrian Popa*. An approximation of gaussian pulses. Proceedings of PECCS 2011 – International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems, pp. 132–138.
3. IEEE 1459-2000 – IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. The Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc. New York, USA, Approved 2 February 2010.
4. EN 50160-2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks.
5. *Georgios C. Kryonidis, Charis S. Demoulias, Grigoris K. Papagiannis*. A new voltage control scheme for active medium-voltage (MV) networks. Electric Power Systems Research, 169 (2019), pp. 53–64.
6. *Cepisca C., Ganatsios S., Andrei H., Grigorescu S.D., Taousanidis N.* Methods for power measurement in energy meters. The Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty, 2008. No. 2. pp. 7–11.
7. *Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshin V.R.* Methods of Multi-Parameter Diagnostics of Electric Equipment Condition Within On-Line Monitoring Systems. Procedia Engineering, 150 (2016), pp. 32–38.
8. *Andrei H., Spinei F., Cepisca C., Voicu N.* Contributions regarding the principles of the minimum dissipated power in stationary regime. In Proceedings of 2006 IEEE Dallas / CAS Workshop on design, applications, integration and software, Dallas, USA, 29–30 October, 2006, pp. 143–147.
9. *Daniel Morinigo-Sotelo, Roque Alfredo Osornio-Rios, Luis Morales-Velazquez, Rene de Jesus Romero-Troncoso, Gilberto Herrera-Ruiz*. Smart sensor network for power quality monitoring in electrical installations. Measurement 103 (2017). pp. 133–142.
10. *Antonio Zecchino, Mattia Marinelli*. Analytical assessment of voltage support via reactive power from new electric vehicles supply equipment in radial distribution grids with voltage-dependent loads. Electrical Power and Energy Systems. 97 (2018). pp. 17–27.
11. *Peretto L., Willems J.L., Emanuel A.E.* The effect of the integration interval on the measurement accuracy of rms values and powers in systems with non-sinusoidal wave forms / Electrical Power Quality and Utilisation Journal. vol. 13. no. 1. 2007. pp. 111–117.
12. *Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S.* The measurement of reactive energy in polluted distribution power systems: an analysis of the performance of commercial static meters. IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 23. no. 3. July 2008. pp. 1296–1301.
13. *Lange P.K., Yaroslavkina E.E.* Approximation methods and tools for measuring data acquisition. Lambert Academic Publishing, Düsseldorf, Germany, 2017. 236 p. (in Russian).
14. *Yakimov V.N.* Digital harmonic analysis of multicomponent random processes. Measurement techniques, Springer US, New York, April 2006, Vol. 49, Issue 4, Pp. 341–347.
15. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multi-

- component processes. Instruments and experimental techniques, Springer US, New York, September 2013, Vol. 56, Issue 5, Pp. 540–545.
16. Jerry L. Bona1 and Hassan M. Fathallah-Shaykh. Approximation by Cubic Splines Leads to Highly Specific Discovery by Microarrays. The Open Bioinformatics Journal, 2008, 2. – pp. 54–59.
 17. Getmanov V.G. Evaluation of Spline Functions for Digital Filtering Problems. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2016, Vol. 55, No. 5, pp. 725–734.
 18. Ланге П.К. Сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // Сборник трудов Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2003. – Вып. 19. – С. 134–138.
 19. Хемминг Р. Цифровые фильтры. – М.: Советское радио, 1980. – 220 с.
 20. Ланге П.К. Схемы для параболической и кубической сплайн-аппроксимации дискретизированных сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 3. – С. 211–215.

Статья поступила в редакцию 22 марта 2019 г.

APPROXIMATION METHOD FOR DETERMINING THE PULSE SIGNAL FORM AND ITS INTENSITY MEASUREMENT WITH AN AVAILABLE RANDOM NOISE

P.K. Lange, E.E. Yaroslavkina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the issues of the operational measurement of a single pulse intensity, as well as the determination of its approximation model. The radar impulse envelope, as well as the peak signal of the analytical instrument, was chosen as the pulse. The pulse square and dispersion were chosen as a measure of intensity. To solve the problem, we use a spline - approximation of discrete samples of the pulse signal. The error of the spline - approximation of the pulse signal discrete values, as well as the error of approximation in the presence of random interference is determined. It is shown that the use of spline approximation reduces the effect of random noise. The characteristics of the proposed method are determined using parabolic, as well as cubic spline approximation. The analysis of the error of the considered method caused by the presence of a random additive interference is given. The characteristics of the considered method are determined when analyzing the Gaussian signal. The dependence of the error of the considered method on the intensity of the random noise is determined. The study was conducted for a uniform distribution of random noise. The structure of the system that implements the described method of spline - approximation of the signal samples is described. It is proposed to use the considered approximation method of measuring the pulsed Gaussian signal intensity when solving problems of its detecting against a noise background, as well as determining its boundaries. It is proposed to use the described methods, if necessary, to promptly determine the effective value of a periodic non-harmonic signal (during no more than half of its period) by determining the dispersion of its one half-wave. It is also proposed to use the described methods to determine the informative parameters of a pulse signal (the position of its beginning, end, amplitude).*

Keywords: *signal dispersion, approximation, random noise, discretization, instantaneous value, spline, pulse signal.*

*Petr K. Lange (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ekanerina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

REFERENCES

1. *Harry L., Van Trees.* Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part III. Radar – Sonar Signal Processing and Gaussian Signals in Noise. John Wiley and Sons. Inc. – New York. – 2001. – 626 p.
2. *Nicolae Dumitru Alexandra, Adrian Popa.* An approximation of gaussian pulses. Proceedings of PECCS 2011 – International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems, pp. 132–138.
3. IEEE 1459-2000 – IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. The Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc. New York, USA, Approved 2 February 2010.
4. EN 50160-2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks
5. *Georgios C. Kroyonidis, Charis S. Demoulias, Grigoris K. Papagiannis,* A new voltage control scheme for active medium-voltage (MV) networks. Electric Power Systems Research, 169 (2019), pp. 53–64.
6. *Cepisca C., Ganatsios S., Andrei H., Grigorescu S.D., Taousanidis N.* Methods for power measurement in energy meters. The Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty, 2008. No. 2. pp. 7–11.
7. *Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshin V.R.* Methods of Multi-Parameter Diagnostics of Electric Equipment Condition Within On-Line Monitoring Systems. Procedia Engineering, 150 (2016), pp. 32–38.
8. *Andrei H., Spinei F., Cepisca C., Voicu N.* Contributions regarding the principles of the minimum dissipated power in stationary regime. In Proceedings of 2006 IEEE Dallas / CAS Workshop on design, applications, integration and software, Dallas, USA, 29–30 October, 2006, pp. 143–147.
9. *Daniel Morinigo-Sotelo, Roque Alfredo Osornio-Rios, Luis Morales-Velazquez, Rene de Jesus Romero-Troncosob, Gilberto Herrera-Ruiz.* Smart sensor network for power quality monitoring in electrical installations. Measurement 103 (2017). pp. 133–142.
10. *Antonio Zecchino, Mattia Marinelli.* Analytical assessment of voltage support via reactive power from new electric vehicles supply equipment in radial distribution grids with voltage-dependent loads. Electrical Power and Energy Systems. 97 (2018). pp. 17–27.
11. *Peretto L., Willems J.L., Emanuel A.E.* The effect of the integration interval on the measurement accuracy of rms values and powers in systems with non-sinusoidal wave forms / Electrical Power Quality and Utilisation Journal. vol. 13. no. 1. 2007. pp. 111–117.
12. *Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S.* The measurement of reactive energy in polluted distribution power systems: an analysis of the performance of commercial static meters. IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 23. no. 3. July 2008. pp. 1296–1301.
13. *Lange P.K., Yaroslavkina E.E.* Approximation methods and tools for measuring data acquisition. Lambert Academic Publishing, Düsseldorf, Germany, 2017. 236 p. (in Russian).
14. *Yakimov V.N.* Digital harmonic analysis of multicomponent random processes. Measurement techniques, Springer US, New York, April 2006, Vol. 49, Issue 4, Pp. 341–347.
15. *Yakimov V.N., Gorbachev O.V.* Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multi-component processes. Instruments and experimental techniques, Springer US, New York, September 2013, Vol. 56, Issue 5, Pp. 540–545.
16. *Jerry L. Bona1 and Hassan M. Fathallah-Shaykh.* Approximation by Cubic Splines Leads to Highly Specific Discovery by Microarrays. The Open Bioinformatics Journal, 2008, 2. – pp. 54–59.
17. *Getmanov V.G.* Evaluation of Spline Functions for Digital Filtering Problems. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2016, Vol. 55, No. 5, pp. 725–734.
18. *Lange P.* Spline-approximation of of signals discrete samples using digital filtering methods. Journal of the Samara State technical university. Series "Phys.-Math. Science". Samara. No. 19, 2003. – pp. 134–138 (in Russian).
19. *Hamming R.* Digital Filters. Prentice Hall inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1977, 224 p.
20. *Lange P.* Circuits for parabolic and cubic spline-approximation of signal sample. Journal of the Samara State technical university. Series "Techn. Science". Samara. No. 3, 2005. – pp. 211–215 (in Russian).