

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>  
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2022, №2 Том 9 / 2022, No 2, Vol 9 <https://resources.today/issue-2-2022.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/04ITOR222.pdf>

DOI: 10.15862/04ITOR222 (<https://doi.org/10.15862/04ITOR222>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Бадалян, Н. П. Метод кусочно-квадратичной интерполяции таблично заданной функции с непрерывной первой производной, основанный на линейном комбинировании центрально симметричных парабол / Н. П. Бадалян, С. А. Сбитнев, Ю. В. Молокин, Е. А. Чашин, В. Е. Шмелев // Отходы и ресурсы. — 2022. — Т. 9. — № 2. — URL: <https://mir-nauki.com/PDF/04ITOR222.pdf> DOI: 10.15862/04ITOR222

**For citation:**

Badalyan N.P., Sbitnev S.A., Molokin Yu.V., Chaschin Ye.A., Shmelev V.Ye. A piecewise quadratic interpolation method for a tabulated function with a continuous first derivative based on a linear combination of centrally symmetric parabolas. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 9(2): 04ITOR222. Available at: <https://mir-nauki.com/PDF/04ITOR222.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/04ITOR222

**УДК 519.652**

**Бадалян Норайр Петикович**

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный технический университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»,  
Владимир, Россия  
Заведующий кафедрой «Электротехника и электроэнергетика»  
Доктор технических наук, доцент  
E-mail: [norayrbadalyan@mail.ru](mailto:norayrbadalyan@mail.ru)

**Сбитнев Станислав Александрович**

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный технический университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»,  
Владимир, Россия  
Профессор кафедры «Электротехника и электроэнергетика»  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [norayrbadalyan@mail.ru](mailto:norayrbadalyan@mail.ru)

**Молокин Юрий Валентинович**

ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», Ковров, Россия  
Доцент кафедры «Электротехника»  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [molokin@dksta.ru](mailto:molokin@dksta.ru)

**Чашин Евгений Анатольевич**

ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», Ковров, Россия  
Заведующий кафедрой «Электротехника»  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [kanircha@list.ru](mailto:kanircha@list.ru)  
РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=42261](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=42261)

**Шмелев Вячеслав Евгеньевич**

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный технический университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»,  
Владимир, Россия  
Доцент кафедры «Электротехника и электроэнергетика»  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [norayrbadalyan@mail.ru](mailto:norayrbadalyan@mail.ru)

## Метод кусочно-квадратичной интерполяции таблично заданной функции с непрерывной первой производной, основанный на линейном комбинировании центрально симметричных парабол

**Аннотация.** В инженерной практике часто приходится иметь дело со справочными и экспериментальными данными, в частности — с таблично заданными функциональными зависимостями. В ходе выполнения технических расчётов нередко требуется интерполировать эти зависимости до промежуточных значений аргумента, не имеющих табличных значений. Для уменьшения погрешности доопределения значений таблично заданных функций, реальным значениям принято увеличивать количество точек массива, что не всегда возможно. Либо, в стандартных алгоритмах перед вычислением интерполирующего выражения требуется выполнение логических операций, чтобы определить, какому отрезку принадлежит аргумент оцениваемой функции. Это существенно увеличивает затраты машинного времени. В работе предложен новый метод кусочно-квадратичной интерполяции таблично заданной функции с непрерывной первой производной, основанный на линейном комбинировании модифицированных центрально симметричных парабол, не требующий при вычислениях применять логические операции для определения частичного отрезка сетки значений аргумента. Предложен оригинальный способ взвешенной минимизации эффекта «раскачки» для неравномерных сеток значений аргумента. В системе MATLAB, с использованием типового метода кусочно-кубической эрмитовой интерполяции с непрерывной первой производной `rpchip`, поддерживаемых выполнен вычислительный эксперимент. На примере известных справочных данных, задающих табличные значения основной кривой намагничивания листовой электротехнической стали 1571 показана высокая численная устойчивость предложенного метода по отношению к эффекту «раскачки» и техническая гибкость при его применении для решения практических задач обработки таблично задаваемых функциональных зависимостей на существенно-неравномерных сетках значений аргумента, в том числе и при малом количестве табличных точек.

**Ключевые слова:** обработка информации; численный метод; интерполяция; сплайн; напряженность; индукция; магнитная проницаемость

### Введение

В инженерной практике часто приходится иметь дело со справочными и экспериментальными данными, в частности — с таблично заданными функциональными зависимостями. В инженерной практике часто приходится иметь дело со справочными и экспериментальными данными, в частности — с таблично заданными функциональными зависимостями. Такие функции характеризуют свойства материалов, а также физических и технических объектов. Например, механические свойства твёрдого вещества часто бывает принято характеризовать диаграммой «напряжение-деформация» при растяжении. Эта диаграмма представляет собой функциональную зависимость условного нормального напряжения образца от относительного удлинения (продольной деформации). Диэлектрические свойства материалов представляются функциональными зависимостями электрической поляризованности вещества или электрического смещения от напряжённости электрического поля. Такие функции называют кривыми поляризации диэлектриков. Существенная их нелинейность проявляется у сегнетоэлектриков. Магнитные свойства материалов представляются функциональными зависимостями намагниченности вещества или магнитной индукции от напряжённости магнитного поля. Такие функции называют кривыми

намагничивания. Существенная их нелинейность проявляется у ферро- и ферритмагнетиков. Свойства технических объектов в значительной степени определяются свойствами материалов, конструктивными исполнениями, геометрическими размерами деталей, элементов и сборок. Простейшими частными случаями технических объектов являются элементы электрических и магнитных цепей. Основные свойства ёмкостных элементов представляются кулон-вольтными характеристиками (зависимостями зарядов электродов от электрических напряжений). Резистивных элементов — вольт-амперными характеристиками, индуктивных элементов — вебер-амперными характеристиками (зависимостями магнитных потокосцеплений соответствующих обмоток от токов, протекающим по ним). Ветвей магнитных цепей — вебер-амперными характеристиками (зависимостями магнитных потоков от магнитных напряжений). Информация о свойствах стандартизированных материалов и изделий из них может содержаться в справочниках в графической или табличной форме в случаях нелинейности соответствующих функциональных зависимостей.

В ходе выполнения технических расчётов требуется доопределять эти зависимости до промежуточных значений аргумента, не совпадающих с табличными [1; 2]. Такое доопределение значений таблично заданных функций в вычислительной принято называть интерполяцией, если доопределённая функция точно проходит через известные точки. В настоящее время известно много методов интерполяции такие как полиномиальные, кусочно-полиномиальные, кусочно-трансцендентные [3]. Наиболее часто применяются полиномиальные и кусочно-полиномиальные методы, различающиеся степенью сложности алгоритмической реализации, гладкостью и склонностью к «раскачке» [4]. Гладкие (непрерывно-дифференцируемые) кусочно-полиномиальные интерполирующие выражения называют сплайнами [5]. Рассмотрим таблично заданную функцию  $f$ , соответствующие значения которой заданы одномерным массивом и записаны в массиве в порядке возрастания. Принимаем, что в некоторых точках  $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}$ , значения функции  $f$  известны (табл. 1).

Таблица 1

**Представление экспериментальной или справочной функциональной зависимости**

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $x$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
| $y$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $y_7$ | $y_8$ |

Используя известный метод кусочно-квадратичной интерполяции, определим зависимость, описывающую распределение между  $n+1$  известными значениями аргумента [6]. В приближении квадратичной функции, интерполяция таблично заданной функциональной зависимости сводится к построению отрезков парабол, соединяющих на графике, построенном в координатах  $(x, y)$ , пару соседствующих точек с координатами  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_2, y_2)$  и  $(x_3, y_3)$ , ...,  $(x_n, y_n)$  и  $(x_{n+1}, y_{n+1})$ . Тогда внутри области определения  $[x_1, x_{n+1}]$  количество таких отрезков составляет  $n$ . Если присвоить каждому отрезку порядковый номер  $i$ , тогда в любом произвольном отрезке интерполирующая функция может быть представлена в виде:

$$y = y_i + b_i(x - x_i) + g_i(x - x_i)^2, \quad (1)$$

где  $b_i, g_i$  — коэффициенты типовой формы записи квадратичной функции, конкретные значения которых вычисляются из условий непрерывности первой производной интерполируемой функции на границах отрезков, т. е. в узлах сетки значений аргумента (табл. 1).

В узлах  $x_i$  не нарушается непрерывность интерполирующего выражения и его первой производной по  $x$ , но она терпит изломы (наблюдаются скачки второй производной по  $x$ ). Таким образом, строится квадратичный сплайн с непрерывной первой производной. Для уменьшения погрешности доопределения значений таблично заданных функций, реальным значениям принято увеличивать количество точек массива, что не всегда возможно. Либо, в стандартных

алгоритмах перед вычислением интерполирующего выражения требуется выполнение логических операций, чтобы определить, какому отрезку принадлежит аргумент оцениваемой функции. Это существенно увеличивает затраты машинного времени. Это делает актуальным разработку метода, позволяющего уменьшить затраты машинного времени на интерполяцию путем построения единого интерполирующего сплайнового выражения на всей области определения  $[x_1, x_{n+1}]$ .

### Теория

В работе предложен метод кусочно-квадратичной интерполяции таблично заданной функции с непрерывной первой производной, основанный на линейном комбинировании модифицированных (центрально симметричных) парабол, которые являются непрерывно-дифференцируемыми первого порядка в узлах  $x_i$ , отличающийся возможностью построения единого интерполирующего сплайнового выражения на всей области определения  $[x_1, x_{n+1}]$ . Принимая во внимание свойство непрерывности первой производной и разрывности второй производной модифицированных парабол, справедливым является предположение модификации парабол заменой последнего слагаемого в выражении (1):

$$g_i(x - x_i)^2 \Rightarrow g_i(x - x_i) \cdot |x - x_i|. \quad (2)$$

В этом приближении формула кусочно-квадратичной интерполяции имеет вид:

$$y = f(x) \approx c_0 + c_1x + c_2x^2 + \sum_{i=3}^{n+1} c_i(x - x_{i-1}) \cdot |x - x_{i-1}|, \quad (3)$$

где  $c_0, c_1, c_i$  — коэффициенты.

При построении сплайна (3) принимаем, что его вторая производная не претерпевает скачков в узлах  $x_1, x_{n+1}$ . Тогда четверть скачка второй производной сплайна  $c_i$  в узле  $x_{i-1}$  удобно определить выражением:

$$c_i = \frac{1}{4} \left( \frac{m_i - m_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} - \frac{m_{i-1} - m_{i-2}}{x_{i-1} - x_{i-2}} \right), \quad (4)$$

где  $m_i$  — наклоны (значения первой производной) строящегося сплайна в узлах  $x_i$  таблично заданной сетки значений аргумента.

Аналогичным образом удобно выразить коэффициент  $c_2$ , который представляет собой половину среднего значения второй производной сплайна на двух крайних отрезках  $[x_1, x_2], [x_n, x_{n+1}]$ :

$$c_2 = \frac{1}{4} \left( \frac{m_{n+1} - m_n}{x_{n+1} - x_n} + \frac{m_2 - m_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (5)$$

Для определения в выражении (3) коэффициентов  $c_0$  и  $c_1$ , определим наклон сплайна  $m_1$ .

$$\frac{df(x)}{dx} \approx c_1 + 2c_2x + 2 \sum_{i=3}^{n+1} c_i |x - x_{i-1}|. \quad (6)$$

Не сложно видеть, что первая производная (6) представляет собой непрерывную кусочно-линейную функцию, поэтому для её значений в узлах таблично заданной сетки справедливо рекуррентное соотношение, из которого следует формула, выражающая  $m_i$  через  $m_1$ :

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{m_{i+1} + m_i}{2} \quad (7)$$

Тогда

$$m_{i+1} = 2 \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - m_i, \quad (8)$$

где 
$$m_i = 2 \sum_{k=1}^{i-1} (-1)^{i-k-1} \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} - (-1)^i m_1.$$

Наклон сплайна  $m_1$  в первой точке сетки удобно определить из условия минимальных колебаний:

$$\sum_{i=1}^n (m_{i+1} - m_i)^2 \cdot |x_{i+1} - x_i|^p \rightarrow \min \quad (9)$$

Перепишем выражение (9) в виде равенства:

$$2 \sum_{i=1}^n \left( (m_{i+1} - m_i) \cdot \frac{d(m_{i+1} - m_i)}{dm_1} \cdot |x_{i+1} - x_i|^p \right) = 0 \quad (10)$$

Выразим из (10) значение  $m_1$ .

$$m_1 = \frac{\sum_{i=2}^{n+1} \left( \left( (-1)^{i-1} \frac{(y_i - y_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} + 2 \sum_{k=2}^i \left( (-1)^k \frac{(y_k - y_{k-1})}{(x_k - x_{k-1})} \right) \right) \cdot |x_i - x_{i-1}|^p \right)}{\sum_{i=2}^{n+1} |x_i - x_{i-1}|^p} \quad (11)$$

Из полученного выражения несложно определить искомые коэффициенты:

$$c_0 = y_1 - c_1 x_1 - c_2 x_1^2 + 2 \sum_{i=3}^{n+1} c_i (x_1 - x_{i-1}) \quad (12)$$

$$c_1 = m_1 - 2c_2 x_1 + 2 \sum_{i=3}^{n+1} c_i (x_1 - x_{i-1}) \quad (13)$$

В качестве показателя колебаний квадратичного сплайна (9) на области определения  $[x_1, x_{n+1}]$  удобным представляется использовать взвешенную сумму квадратов приращений первой производной интерполирующего выражения (3) на частичных отрезках  $[x_i, x_{i+1}]$ . Вес каждого слагаемого в этой сумме — длина частичного отрезка в степени  $p$ . Параметр  $p$  предлагаемого метода интерполяции можно задавать произвольно. Чем больше величина  $p$ , тем больше будут различаться веса частичных отрезков разных длин. Задаваемое значение показателя  $p$  может принимать любое конечное действительное число. Если сетка значений аргумента (табл. 1, строка 1) равномерная, то показатель  $p$  никак не будет влиять на построение сплайна (3). Новизна и практическая значимость предложенного метода сплайновой интерполяции заключается в возможности варьировать параметр  $p$ , что является особенно актуальным для неравномерных сеток аргумента.

Если задать  $p = 0$ , то минимизируемая целевая функция в (10) — сумма квадратов приращений первой производной сплайна на всех частичных отрезках сетки значений аргумента. Все слагаемые в этой сумме будут иметь одинаковый вес независимо от длин частичных отрезков. Если задать  $p = -2$ , то минимизируемая целевая функция в (10) —

невзвешенная сумма квадратов значений второй производной сплайна (3) на всех частичных отрезках сетки значений аргумента. Эти значения второй производной равны  $\frac{m_{i+1} - m_i}{x_{i+1} - x_i}$ . Это следует из свойства кусочного постоянства второй производной строящегося сплайна (3). В узлах сетки значений аргумента  $x_i$  вторая производная терпит разрывы первого рода. Выражение для второй производной сплайна (3) имеет вид:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \approx 2c_2 + 2 \sum_{i=3}^{n+1} c_i \text{sign}(x - x_{i-1}) \quad (14)$$

Из приведённых рассуждений следует, что при практическом применении разработанного метода построения сплайна (3) задавать значения степенного параметра  $p$  для весовых множителей минимизируемой целевой функции (10), меньшие чем -2, как правило, не имеет смысла, т. к. колебательность сплайна будет подавляться в основном на мелких отрезках сетки значений аргумента, а на длинных отрезках колебательность будет возрастать. Всегда есть смысл задавать  $p \geq -2$ , т. к. при таком задании всегда можно подобрать оптимальное значение степенного параметра на неравномерной сетке, особенно в тех случаях, когда справочных данных о нелинейной функции технического или физического объекта мало для эффективной гладкой интерполяции.

Общий порядок построения сплайна (3) предполагает последовательное выполнение 5 действий:

- по формуле (11) вычисляется значение  $m_1$  наклона (первой производной) сплайна (3) в первом узле сетки значений аргумента  $x_1$ , минимизирующее целевую функцию колебательности («раскачки») (10);
- по рекуррентной формуле (7) определяются все значения  $m_i$  первой производной интерполируемой функции в узлах сетки значений аргумента  $x_i$ ;
- рассчитываются коэффициенты  $c_i$  по формуле (4) по уже известным значениям  $m_i$ ;
- по формуле (5) вычисляется  $c_2$ ;
- по формулам (12, 13) определяются  $c_1$  — коэффициент при линейном слагаемом сплайна (3),  $c_0$  — постоянное слагаемое строящегося сплайна.

## Результаты

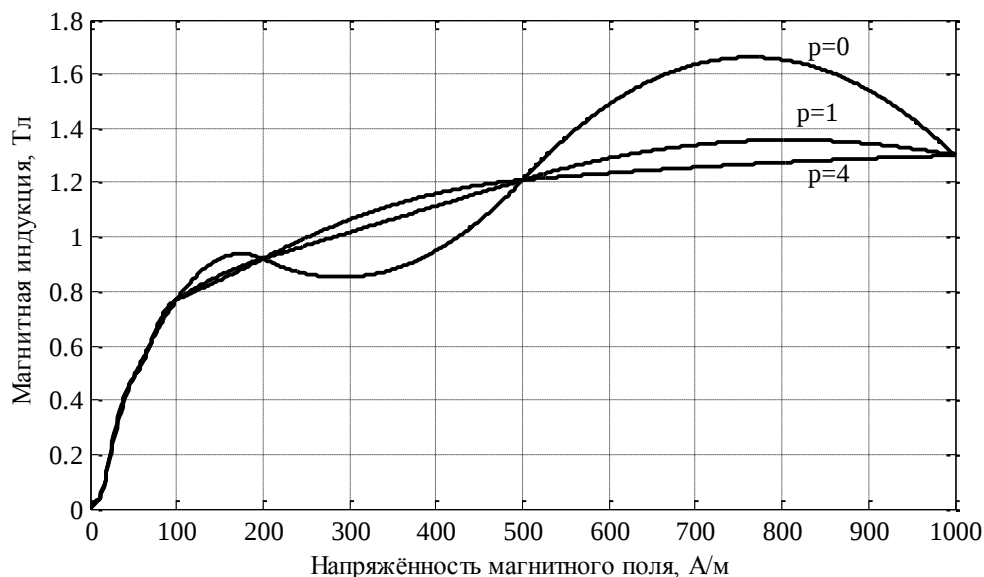
Алгоритм построения сплайна (3) удобно реализовать в виде  $m$ -функции в системе MATLAB. В этом случае, алгоритм вычисления интерполирующего выражения в нужном массиве точек также будет представлен в виде  $m$ -функции. Рассмотрим в качестве примера основную кривую намагничивания листовой электротехнической стали 1571 толщиной 0.35 мм, заданную таблично (табл. 2) [6].

**Таблица 2**  
**Основная кривая намагничивания электротехнической стали 1571**

|                  |       |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H, \text{ А/м}$ | 10    | 20   | 50   | 70   | 100  | 200  | 500  | 1000 |
| $B, \text{ Тл}$  | 0.035 | 0.14 | 0.48 | 0.61 | 0.77 | 0.92 | 1.21 | 1.3  |

С помощью интерполяционного выражения (3) представим эту характеристику гладкой кривой, считая, что при напряженности магнитного поля  $H = 0 \text{ А/м}$ , магнитная индукция  $B = 0 \text{ Тл}$ . На рисунке 1 представлен результат гладкой интерполяции основной кривой

намагничивания заданной таблично при разных значениях параметра  $p$ . При  $p = 2$  и  $3$  расчётные кривые визуально практически сливаются с кривой, полученной при значении  $p = 4$ , поэтому они на рисунке 1 не показаны.



**Рисунок 1.** Результат интерполяции кривой намагничивания (разработан авторами)

### Обсуждение

Метод интерполяции таблично заданной функции можно считать приемлемым, если его применение не нарушает математические, физические и технические свойства соответствующего класса функций. Основная кривая намагничивания должна быть монотонной, а её производная т. е. абсолютная дифференциальная магнитная проницаемость в любой точке должна быть больше или равной основной магнитной постоянной  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м и должна стремиться к этой величине при стремлении напряжённости магнитного поля к бесконечности. Т. о. определение дифференциальной магнитной проницаемости позволяет оценить достоверность интерполяции.

Полагая, что производная интерполирующего выражения (3) имеет вид (6), оценим производную таблично заданной функции (табл. 2) в произвольной точке области определения  $[x_1, x_{n+1}]$ . Известно, что дифференциальная магнитная проницаемость может быть определена как:

$$\mu_d = \mu_0^{-1} \frac{dB}{dH} . \quad (15)$$

Используя выражения (8, 9), оценим значения относительной дифференциальной магнитной проницаемости анализируемой марки стали при значениях напряжённости магнитного поля  $H = 0$  А/м и при  $H = 1000$  А/м. Результаты расчета приведены в таблице 3.

**Таблица 3**

#### Оценочные значения относительной дифференциальной магнитной проницаемости стали

| $p$              | 0      |         | 1      |         | 2      |         | 3      |       | 4      |        |
|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|--------|--------|
| $H, \text{ А/м}$ | 0      | 1000    | 0      | 1000    | 0      | 1000    | 0      | 1000  | 0      | 1000   |
| $\mu_d$          | 1464.2 | -2440.4 | 3429.8 | -474.81 | 3853.2 | -51.357 | 3934.3 | 29.66 | 3975.7 | 71.121 |

Анализ кривых (рис. 1) и данных в таблице 3 показывает, что при значениях  $p < 3$  гладкая интерполяция таблично заданной основной кривой намагничивания стали даёт технически неприемлемые результаты. В частности, имеются области значений напряженности магнитного поля  $H$  с отрицательной дифференциальной магнитной проницаемостью, что противоречит известным результатам исследований магнитных свойств ферромагнетиков любой топологии [7; 8]. При  $p \geq 3$  получаются технически приемлемые результаты кусочно-квадратичной интерполяции с непрерывной первой производной, т. к. при всех значениях  $H$ . Наиболее реалистичная интерполяционная кривая намагничивания получилась при значениях  $p = 4$  (особенно в сильных магнитных полях). Малые значения  $p \leq 1$  можно задавать при анализе справочных кривых намагничивания в слабых магнитных полях, особенно при необходимости оценки начальной магнитной проницаемости.

Как было показано выше, вычисления по предложенному методу выполнены в системе MATLAB. Следует отметить, что из типовых методов интерполяции, поддерживаемых системой MATLAB наиболее приемлемый результат дал метод `rchp` (кусочно- кубическая эрмитова интерполяция с непрерывной первой производной) [9; 10], однако принципиальный недостаток этого метода — нулевое значение производной интерполяционного выражения в начальной и конечной точках таблично заданной кривой.

### Выводы

В работе предложен метод одномерной кусочно-квадратичной интерполяции с непрерывной первой производной в представленных вычислительных экспериментах показал высокую численную устойчивость по отношению к эффекту «раскачки» и техническую гибкость при его применении для решения практических задач обработки таблично задаваемых функциональных зависимостей на существенно- неравномерных сетках значений аргумента, в том числе и при малом количестве табличных точек.

Показан пример применения разработанного метода интерполяции для численного представления свойств магнитомягких материалов, из которых изготавливают магнитопроводы генераторов электростанций, силовых и измерительных трансформаторов, входящих в состав электроэнергетических систем. Предложенный метод является частью методов моделирования названных объектов электроэнергетики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебо И.Г., Тишкин Ф.В. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 304 с.
2. Шилов И.В., Чашин Е.А. Математическое моделирование процесса возникновения эффекта самоконцентрации лазерного излучения в парогазовом канале // Вестник ИГЭУ. — 2009. — № 4. — С. 41–44.
3. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 720 с. — ISBN 5-8459-0162-6.
4. Ильина В.А., Силаев П.К. Численные методы для физиков-теоретиков. I. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — 132 с. — ISBN 5-93972-231-8.
5. Волков Е.А. Численные методы. — М.: Наука, 1987. — 248 с.
6. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. — М: Энергия, 1980. — 520 с.
7. Арутюнов Ю.А. и др. Сравнительный анализ влияния топологии магнитопровода на отклик при внешнем электромагнитном воздействии для магнитопровода с различными геометрическими параметрами / Ю.А. Арутюнов, А.А. Дробязко, А.И. Крылов, А.А. Митрофанов, Е.А. Чашин, П.А. Шашок / Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, № 1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN117.pdf>.
8. Арутюнов Ю.А. и др. Влияние топологии Мебиуса на магнитные свойства магнито-мягких ферромагнетиков в замкнутой магнитной цепи / Ю.А. Арутюнов, Н.П. Бадалян, А.А. Дробязко, Е.А. Чашин, П.А. Шашок / Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, № 1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/53TVN117.pdf>.
9. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation // SIAM J. Numerical Analysis, Vol. 17, 1980, pp. 238–246.
10. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software / — Prentice Hall, 1988.

**Badalyan Norayr Petikovich**

Vladimir State University named after Aleksandr Grigorevich and Nikolai Stoletov, Vladimir, Russia  
E-mail: norayrbadalyan@mail.ru

**Sbitnev Stanislav Aleksandrovich**

Vladimir State University named after Aleksandr Grigorevich and Nikolai Stoletov, Vladimir, Russia  
E-mail: norayrbadalyan@mail.ru

**Molokin Yuriy Valentinovich**

The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia  
E-mail: molokin@dksta.ru

**Chaschin Yevgeny Anatolievich**

The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia  
E-mail: kanircha@list.ru

RSCI: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=42261](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=42261)

**Shmelev Vyacheslav Yevgenevich**

Vladimir State University named after Aleksandr Grigorevich and Nikolai Stoletov, Vladimir, Russia  
E-mail: norayrbadalyan@mail.ru

## **A piecewise quadratic interpolation method for a tabulated function with a continuous first derivative based on a linear combination of centrally symmetric parabolas**

**Abstract.** In engineering practice, it is often necessary to deal with reference and experimental data, in particular, with tabulated functional dependencies. In the course of performing technical calculations, it is often necessary to interpolate these dependencies to intermediate argument values that do not have tabular values. To reduce the error in determining the values of tabulated functions, it is customary to increase the number of array points to real values, which is not always possible. Or, in standard algorithms, before calculating the interpolating expression, logical operations are required to determine which segment the argument of the evaluated function belongs to. This significantly increases the cost of machine time. A new method of piecewise quadratic interpolation of a tabulated function with a continuous first derivative is proposed, based on a linear combination of modified centrally symmetric parabolas, which does not require logical operations to determine a partial segment of the grid of argument values during calculations. An original method of weighted minimization of the "swing" effect for uneven grids of argument values is proposed. A computational experiment was performed in the MATLAB system using the typical piecewise cubic Hermitian interpolation method with continuous first derivative pchip. Using the example of well-known reference data specifying tabular values of the main magnetization curve of sheet electrical steel 1571, the high numerical stability of the proposed method with respect to the "swing" effect and technical flexibility in its application to solve practical problems of processing tabular functional dependencies on substantially uneven grids of argument values, including with a small number of tabular points.

**Keywords:** data processing; numerical method; interpolation; spline; tension; induction; magnetic permeability