

ДИСКРЕТНЫЕ В-СПЛАЙН ФИЛЬТРЫ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В задачах мониторинга рабочего процесса судовых дизелей целесообразно применение систем цифровой обработки дискретных сигналов, в которых необходимо подавлять шумы, так как они увеличивают погрешность определения основных параметров рабочего процесса. В случае применения методов алгоритмической синхронизации данных [1] шумы, на участке сжатия могут увеличить фазовую погрешность синхронизации, что существенно влияет на точность расчета среднего индикаторного давления и индикаторной мощности цилиндра.

В системах разделенного мониторинга рабочего процесса [2], где применяется метод накопления и предварительного анализа данных реального времени, актуальной проблемой, наряду с подавлением шумов, является компрессия данных. Системы разделенного мониторинга выполнены в виде автономных устройств с ограниченным объемом памяти. Требуемый для корректного описания рабочего процесса в цилиндре объем данных достаточно велик, если учесть шаг дискретизации не более $0,5^\circ$ ПКВ, двухбайтовый размер одной записи, два информационных канала и количество циклов для осреднения 7 ... 20. При большом объеме данных по одному цилиндру и требовании иметь резерв памяти для индицирования максимального числа цилиндров в течение одного сеанса, вопрос компрессии исходных данных, безусловно, актуален.

Для подавления шумов и компрессии исходных данных мониторинга рабочего процесса предлагается использовать В-сплайн фильтры.

Сплайн-функции (далее просто сплайны) являются одним из вариантов описания сигнала как в непрерывной, так и в дискретной областях. Аппроксимация сплайнами в базисной или В-форме, которая является альтернативой классической теоремы о дискретизации Котельникова [3, 4].

Используем понятие функционального пространства полиномиальных сплайнов степени S_1^n , где верхний индекс n соответствует степени сплайн-функции, а нижний – расстоянию между узлами аппроксимации.

Пусть некоторая функция $g^n(x) = S_1^n$, тогда:

$$S_1^n = \left\{ g^n(x) = \sum_{k \in Z} c(k) \beta^n(x-k), (x \in R, c \in l_2) \right\}, \quad (1)$$

где $\beta(x)$ - центрированный базисный или B -сплайн степени n ; $c(k)$ - B -сплайн коэффициенты функции $g^n(x)$.

Фактически (1) дает однозначное представление функции $g^n(x)$ в дискретной области в виде последовательности коэффициентов $c \in l_2$ [4].

В первую очередь аппарат сплайн-приближений используется в задачах интерполяции функций, однако, кроме этого, сплайны с успехом применяют для подавления шумов (сглаживающие сплайны), для подавления шумов и оптимальной интерполяции функций, не являющихся сплайнами (оптимальные сплайны), а также компрессии данных, представленных в дискретной форме [5].

Фундаментальная проблема сплайн-интерполяции функций заключается в точном определении B -сплайн коэффициентов в (1) [6]. Для сплайнов нулевой степени (кусочно-постоянная интерполяция) и первой степени (кусочно-линейная аппроксимация) решение тривиально – B -сплайн коэффициенты совпадают с отсчетными значениями функции $c(k) = g^n(k), k \in Z$. Для сплайнов высших степеней ситуация становится более сложной. Традиционным подходом в задаче отыскания B -сплайн коэффициентов является использование арсенала численных методов для решения систем линейных алгебраических уравнений [6,7].

Однако, в начале 1990-х г. был найден другой способ решения этой задачи – применение техники цифровой фильтрации [5, 8].

Дискретный B -сплайн b_m^n , может быть получен дискретизацией непрерывного B -сплайна степени n , носитель которого растянут в целое число m раз:

$$b_m^n(k) = \beta^n(x/m) \Big|_{x=k}, \quad k \in Z \quad (2)$$

и его Z -преобразование [3]

$$B_m^n(z) = \sum_{k \in Z} b_m^n(k) \cdot z^{-k}. \quad (3)$$

Аналогично (1), для дискретного входного сигнала $s(k)$ требуется найти коэффициенты c такие, чтобы:

$$\forall k \in Z \quad \sum_{l \in Z} c(l) \cdot \beta^n(x-l) \Big|_{x=k} = s(k). \quad (4)$$

Выражение (4) можно описать в виде дискретной свертки

$$s(k) = (b_1^n * c)(k), \quad (5)$$

а решение (5) относительно коэффициентов

$$c(k) = \left((b_1^n)^{-1} * s \right)(k), \quad (6)$$

где $(b_1^n)^{-1}$ - оператор, выполняющий прямое B -сплайн преобразование, который в Z -области описывается как

$$(b_1^n)^{-1}(k) \xleftrightarrow{Z} \frac{1}{B_1^n(z)}. \quad (7)$$

Выражения (3) и (7) есть ни что иное, как передаточные функции цифровых B -сплайн фильтров, выполняющих прямое (7) и обратное (3) B -сплайн преобразование. Выражение (7) является цифровым фильтром с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Устойчивость таких фильтров доказана в [9], а вычисление B -сплайн коэффициентов проще и быстрее, чем любым другим численным методом. Выражение (3) описывает цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой, безусловно устойчивый.

Если входной сигнал подвергается воздействию шума, и его отсчеты представлены неточными значениями, для восстановления сигнала применяют сглаживающие сплайны [5, 6]. Для набора дискретных значений сигнала $\{s(k)\}$, сглаживающий сплайн $g^n(x)$ степени $2r-1$ определяется как функция, которая минимизирует функционал

$$\varepsilon_S^2 = \sum_{k \in Z} (s(k) - g^n(k))^2 + \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial^r g^n(x)}{\partial x^r} \right)^2 dx, \quad (8)$$

где λ - некоторый вещественный положительный коэффициент. Этот метод предполагает компромисс между желанием аппроксимировать входной сигнал как можно ближе к имеющимся отсчетным значениям, и требованием, чтобы функция была сглажена. Последнее требование зависит от значения квадрата интеграла ее r -ой производной, умноженное на коэффициент λ .

Реализация данного метода с помощью цифровых B -сплайн фильтров приведена на рис. 1.

К недостатком данного метода подавления шумов можно отнести: эмпирический выбор параметра λ ; сложность реализации (полноса передаточной функции $S_\lambda^n(z)$ [5] для $n > 4$ аналитически найти невозможно); потерю информации об особых точках функции при

больших значениях параметра λ .

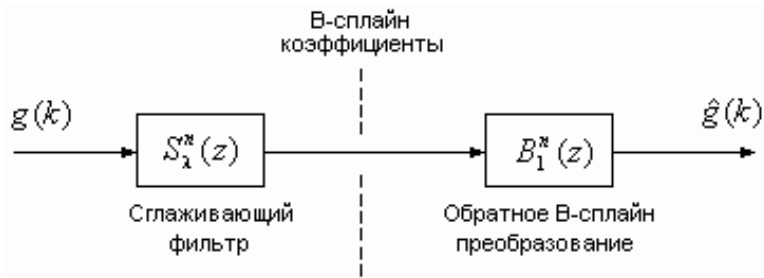


Рис. 1. Схема сглаживающей B-сплайн фильтрации: $g(k)$ - дискретный входной сигнал; $S_\lambda^n(z)$ - передаточная функция сглаживающего B-сплайн фильтра степени n ; $B_1^n(z)$ - передаточная функция фильтра, выполняющего обратное B-сплайн преобразование; $\hat{g}(k)$ - дискретный выходной сигнал

Этих недостатков лишена оптимальная в смысле наименьших квадратов сплайн-фильтрация сигнала. Кроме подавления шумов, и наилучшего приближения произвольных входных сигналов, система на базе оптимальных цифровых B-сплайн фильтров интересна с точки зрения компрессии данных. Структурная схема оптимальной B-сплайн фильтрации представлена на рис. 2.

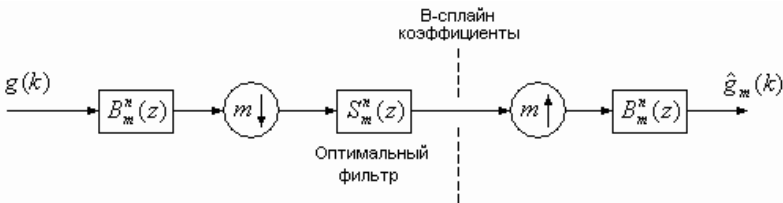


Рис. 2. Схема оптимальной B-сплайн фильтрации: $g(k)$ - дискретный входной сигнал; $m \downarrow, m \uparrow$ - оператор понижения/повышения частоты дискретизации в m раз; $B_m^n(z)$ - передаточная функция фильтра, выполняющего обратное B-сплайн преобразование; $S_m^n(z)$ - передаточная функция оптимального B-сплайн фильтра; $\hat{g}_m(k)$ - выходной дискретный сигнал

Согласно рис. 2 алгоритм вычисления оптимальных B -сплайн коэффициентов входного сигнала состоит из трех этапов: предварительной фильтрации отсчетов входного сигнала фильтром с передаточной функцией $B_m^n(z)$; уменьшение частоты дискретизации в m раз, а значит и уменьшение количества B -сплайн коэффициентов во столько же раз; последующей фильтрации фильтром с передаточной функцией $S_m^n(z)$.

Компрессию данных оценим с учетом представления чисел в памяти устройства цифровой обработки сигналов. Данные, поступающие с аналогово-цифрового преобразователя, разрядность которого составляет 12 - 16 бит, является целыми числами. B -сплайн коэффициенты могут быть представлены 4-х байтовыми вещественными числами, что соответствует 7 - 8 значащим цифрам. Поэтому коэффициент сжатия информации в оптимальных B -сплайн системах мы будем оценивать как отношения объема памяти, выделяемой для хранения исходных данных, к объему памяти, в которую записываются B -сплайн коэффициенты (табл.).

Таблица

Оценка сжатия информации в оптимальных B -сплайн системах
с $m = \overline{2,4}$

Кол-во входных отсчетов	Объем памяти для хранения, байт	m	Кол-во B -сплайн коэффициентов	Объем памяти для хранения B -сплайн коэффициентов, байт	Коэффициент сжатия информации K
1024	1024x2	2	512	512x4	2048/2048=1
		3	341	341x4	2048/1364≈1,5
		4	256	256x4	2048/1024=2

Рассмотрим возможность подавления шумов в системах, построенных на основе оптимальных B -сплайн фильтров 3-ей степени, с изменением частоты дискретизации в 2 и 3 раза ($K=1$ и 1,5 соответственно). Для этого, к входному сигналу $s(k)$ добавим дискретный белый "гауссовский" шум $n(k)$:

$$s_n(k) = s(k) + n(k), k = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где N – количество входных отсчетов.

Суммарная погрешность измерительного канала системы мониторинга в среднем составляет до 2 %. Исходя из этого, диапазон значе-

ний аддитивного белый шума составляет $\pm 2\%$ от $s_{\max}(k)$.

Относительную погрешность восстановления исходного сигнала оценим по критерию среднеквадратических отклонений от исходных значений [10]

$$\delta_{rec} = \left(\frac{\sum_{k=1}^N |s_{rec}(k) - s(k)|^2}{\sum_{k=1}^N |s(k)|^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

На рис. 3 приведены исходный (а), "зашумленный" (б) и восстановленный (в) сигналы для системы с $m=2$, а на рис. 4 приведен восстановленный сигнал для системы с $m=3$.

Оценка восстановления сигнала в B -сплайн системах третьей степени следующая: при $m=2$ относительная погрешность восстановления сигнала $\delta_{rec} = 2,4\%$, для $m=3$ относительная погрешность меньше: $\delta_{rec} = 1,7\%$.

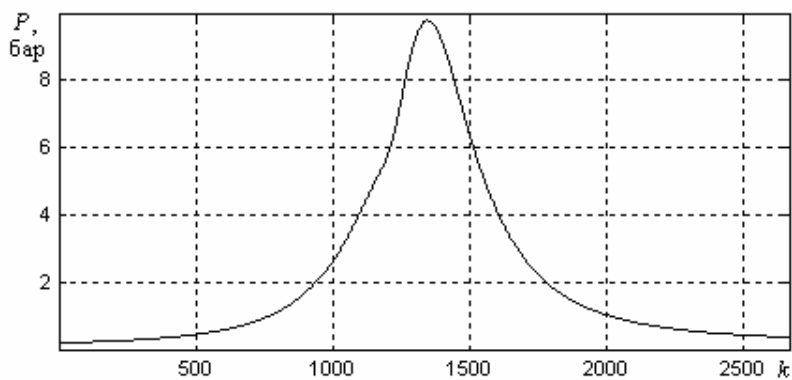
По результатам исследования можно сделать следующие *выводы*.

Применение оптимальных B -сплайн систем обеспечивает приемлемую для практического использования фильтрацию шумов, присутствующих в сигналах при мониторинге рабочего процесса судовых дизелей.

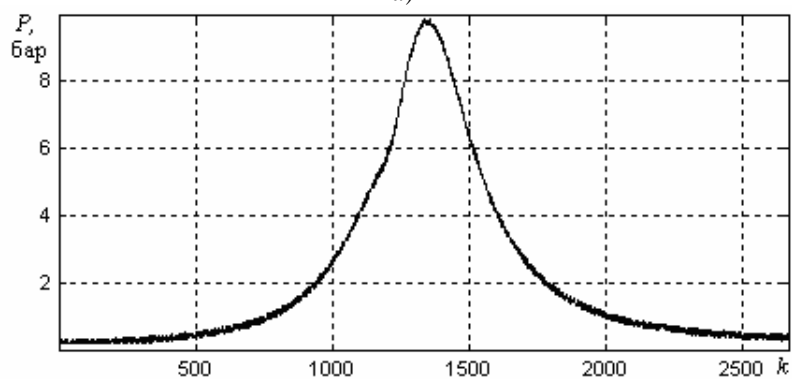
Анализ компрессии данных в оптимальных B -сплайн системах показывает, что при уменьшении числа B -сплайн коэффициентов в 3 раза ($m=3$), объем памяти необходимый для хранения информации, уменьшается в 1,5 раза, при $m=4$ – объем памяти уменьшается в 2 раза.

В результате моделирования данных мониторинга рабочего процесса видно, что наряду с увеличением компрессии данных уменьшается погрешность восстановления исходного сигнала для случая $m=3$.

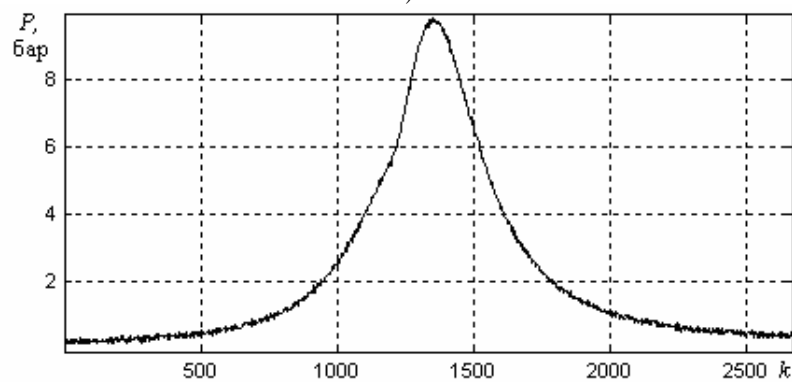
В качестве дальнейшего исследования методов цифровой обработки данных мониторинга рабочего процесса целесообразно провести сравнительный анализ B -сплайн фильтров, фильтров Кальмана и цифровых фильтров на базе преобразования Фурье. В качестве оценки точности определения основных параметров рабочего процесса после цифровой обработки сигнала необходимо произвести анализ погрешности определения среднего индикаторного давления и момента начала самовоспламенения топлива P_c' - контрольной точки, точность определения которой влияет на качество алгоритмической синхронизации.



a)



б)



в)

Рис. 3. Оптимальная B -сплайн фильтрации третьей степени с $m=2$

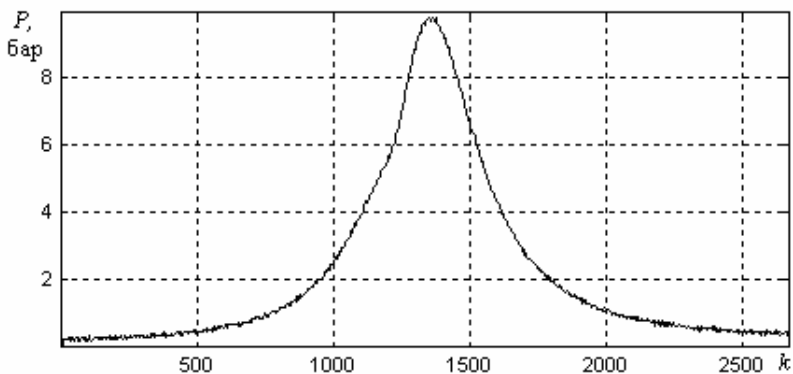


Рис. 4. Восстановление сигнала в системе оптимальной B -сплайн фильтрации третьей степени с $m=3$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановский В.Г., Варбанец Р.А. Система разделенного мониторинга D3.2H, определение параметров рабочего процесса СДВС МАК M25 // Збірник наукових праць. ВМІ ім. П.С. Нахімова. - 2005. - Вип. 1(7). – Севастополь. - С. 145 - 153.
2. Варбанец Р.А. Синхронизация данных при индцировании СДВС // Збірник наукових праць. ВМІ ім. П.С. Нахімова. - 2005. - Вип. 2(8). – Севастополь. - С. 255 - 259.
3. Куприянов М.С., Матюшкин Б.Д. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: Политехника, 2000. - 592 с.
4. Unser M. Sampling – 50 year after Shannon // Proc. of the IEEE. - 2000. - Vol. 88. - №4. - P. 569 - 586.
5. Unser M., Aldroubi A., Eden M. B-Spline Signal Processig: part I – Theory // IEEE Transaction Signal Processing. - 1993. - Vol. 41 – February. - P. 821 - 833.
6. Макаров В.Л., Хлобыстов В.В. Сплайн-аппроксимация функций: учеб. пособие для студентов ВУЗов. - М.: Высшая школа, 1983. - 80 с.
7. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее применение. - М.: Мир, 1972. – 323 с.
8. Unser M. Splines: A perfect fit for signal and image processing // IEEE Signal Processing Magazine. - 1999. - Vol. 16. - №6. - P. 22 - 38.
9. Unser M, Aldroubi A., Eden M. Fast B-Spline transform for continuous image representation and interpolation // IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell. - 1991. - Vol. 13 – Mar. - P. 277 - 285.

10. Gröchenig K, Schwab H. Fast local reconstruction methods for nonuniform sampling in shift invariant spaces // SIMAX. - 2003. - Vol. 24. - Issue 4. - P. 899 - 913.