

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.39:681.327.8

С. М. Кулаков, И. В. Чичерин, В. А. Полетаев

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАЙНОВ ДЛЯ АДАПТИВНОГО СЖАТИЯ СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В системах автоматизации технологических процессов часто возникает необходимость в длительном хранении сигналов измерительной информации с целью анализа эффективности процессов, оптимизации алгоритмов автоматического управления, анализа аварийных ситуаций, выявления причин брака и т. д. В связи с тем, что объемы хранимых данных велики, актуальна задача их сжатия.

Структурная схема встроенной в АСУТП системы хранения данных представлена на рис. 1. Подсистемы измерения формируют натурные (H) сигналы измерительной информации (СИИ) W_k^H, U^H, S^H, Y^H , искаженные влиянием помеховых воздействий $N_w^H, N_U^H, N_S^H, N_Y^H$. В состав подсистемы оценивания могут входить: аналого-цифровой преобразователь, противоподменные фильтры, блоки оценивания, которые преобразуют выходной сигнал $\tilde{Z} = \{\tilde{W}, \tilde{U}, \tilde{S}, \tilde{Y}\}$ в данные, подлежащие хранению $\tilde{Z}(t_i)$. Буфер памяти предназначен для временного хранения оперативных данных с целью формирования массивов, необходимых для работы алгоритма сжатия. Сжатые данные $\tilde{Z} = F(\tilde{Z}(t_i))$ с выхода кодера, реализующего алгоритм сжатия, поступают в динамическую базу данных (ДБД). Декодер, по запросу пользователя (исследователя), восстанавливает сигнал $\hat{Z}(t_i)$, который отличается от $\tilde{Z}(t_i)$

на величину ε , значение которой зависит от качества алгоритма сжатия и свойств данных, подлежащих сжатию (по условию задачи сжатия $\varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$).

Эффективность функционирования подсистемы хранения данных зависит, главным образом, от используемого алгоритма сжатия-восстановления СИИ. Последний должен умень-

шать объем поступающих на его вход данных и при этом обеспечивать требуемую точность при их восстановлении.

Содержательно задача синтеза алгоритма сжатия-восстановления скалярного сигнала $\tilde{Z}(t_i) \in \tilde{Z}(t_i)$ может быть сформулирована следующим образом: на основании априорных сведений о свойствах дан-

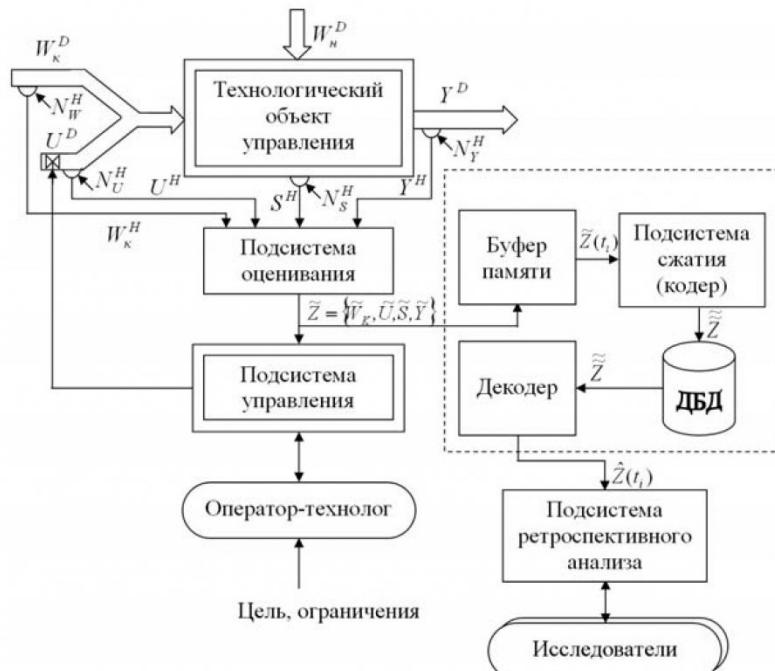


Рис. 1. Схема АСУТП со встроенной подсистемой анализа СИИ: W_k^D, W_n^D, U^D, Y^D – действительные (D) контролируемые (k) и неконтролируемые (n) возмущающие (W), управляющие (U) воздействия и выходные (Y) сигналы; W_k^H, S^H, U^H, Y^H – натуральные (H) контролируемые возмущающие и управляющие воздействия, сигналы состояний (S) и выходные; $N_w^H, N_U^H, N_S^H, N_Y^H$ – натуральные помеховые (N) воздействия в каналах измерений контролируемых возмущающих и управляющих воздействий, сигналов состояний и выходных; $\tilde{Z}(t_i)$ – вектор оценок СИИ в момент t_i ; \tilde{Z} – вектор сжатого СИИ; $\hat{Z}(t_i)$ – вектор восстановленного после сжатия СИИ

ных $\tilde{z}(t_i)$ подлежащих сжатию и заданной точности ε_{\max} получения оценки $\hat{z}(t_i)$ найти наиболее эффективное представление данных $\tilde{z}(t_i)$, минимизировав объем требуемой памяти $V(\tilde{z})$ для хранения данных \tilde{z} на выходе кодера или

$$V(\tilde{z}) \rightarrow \min; \\ |\hat{z}(t_i) - \tilde{z}(t_i)| = \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}. \quad (1)$$

Таким образом, синтез алгоритма сжатия состоит в такой on-line аппроксимации \tilde{z} данных $\tilde{z}(t_i)$, которая позволяет свести к минимуму размерность пространства данных, выполнив условия восстановления данных $\tilde{z}(t_i)$ по данным \tilde{z} с заданной точностью ε_{\max} .

В качестве аппроксимирующих функций мы предлагаем использовать сплайны (это связано с относительно простой реализацией алгоритмов сжатия на их основе). Сплайны применяют для сжатия речевых и статических видеосигналов [1], реографических сигналов и растровых изображений [2]. В [3] предлагается использовать сплайны для сжатия временных рядов ДБД различного назначения. Однако алгоритмы, предложенные в этих работах, неэффективны для обработки реальных сигналов измерительной информации систем автоматизации технологических процессов, так как они не учитывают свойства и особенности этих сигналов (изменчивость тренда и свойства помех, наличие выбросов и обрывов сигнала).

Рассмотрим постановку задачи алгоритмизации сжатия на основе кубических сплайнов для систем автоматизации технологических процессов.

Дано:

1) Алгоритм вычисления кубического сглаживающего сплайна:

$$S(i) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2 + a_3 \cdot i^3;$$

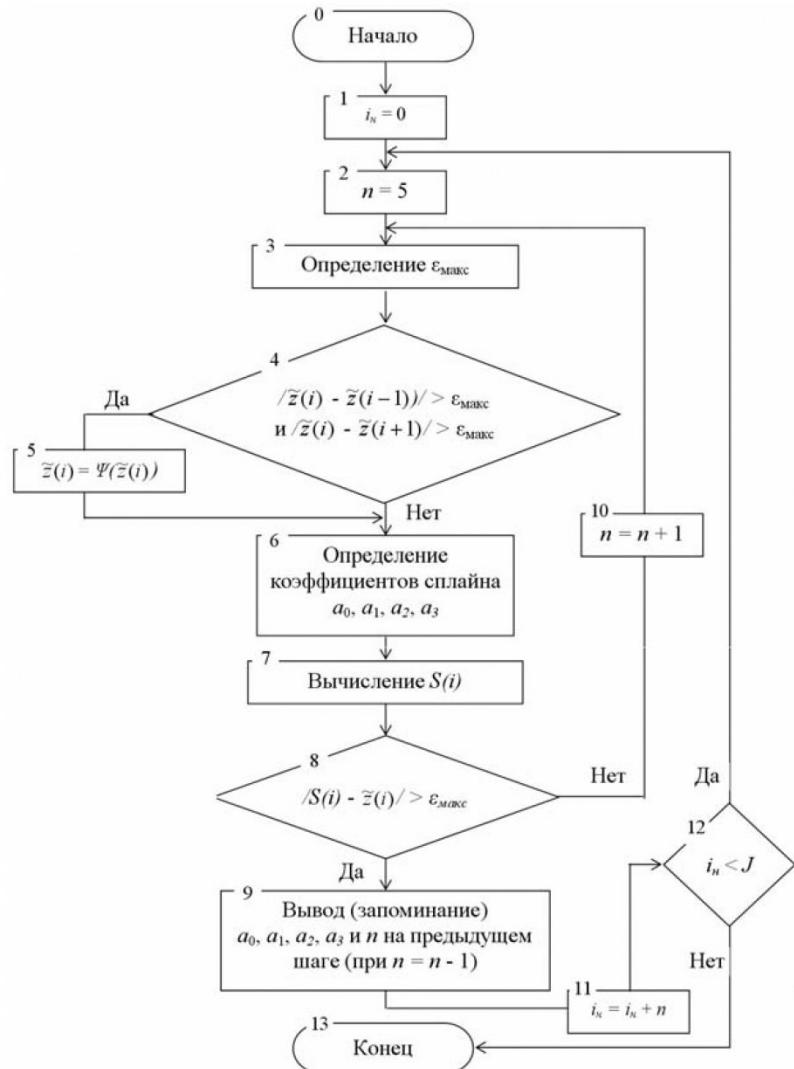


Рис. 2. Предлагаемый алгоритм сжатия
(2)

$$(a_0, a_1, a_2, a_3) = F_{\text{МНК}} \{ \tilde{z}(0), \tilde{z}(1), \dots, \tilde{z}(i), \tilde{z}(i+1), \dots, \tilde{z}(n-1) \}, \quad (3)$$

a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты сплайна; $\tilde{z}(i)$ – сигнал измерительной информации; $i = 0, 1, \dots, (n-1)$; n – количество отсчетов сплайна; $F_{\text{МНК}} \{ \dots \}$ – оператор, реализующий метод наименьших квадратов (МНК) [4].

2) Модель зашумленного скалярного СИИ в виде аддитивной смеси полезного сигнала и помехи:

$$\tilde{z}(i) = \begin{cases} Z_{\min}, & \text{если } \tilde{z}(i) < Z_{\min}; \\ \tilde{z}_{\text{T}}(i) + \varepsilon_{\phi}(i) + \varepsilon_{\varepsilon}(i), & \text{если } Z_{\min} \leq \tilde{z}(i) \leq Z_{\max}; \\ Z_{\max}, & \text{если } \tilde{z}(i) > Z_{\max}, \end{cases}$$

где $\tilde{z}_{\text{T}}(i)$ – полезная (трендовая) составляющая СИИ, которая характеризуется низкими частотами и может иметь разрывы; $\varepsilon_{\phi}(i)$ – флуктуационная помеховая составляющая (подчиняющаяся например нормальному закону распределения с плавно изменяющейся дисперсией $D(\varepsilon_{\phi}) = \text{var}$); $\varepsilon_{\varepsilon}(i)$ – грубые выбросы с переменной частотой появления; Z_{\min} и Z_{\max} – априорно известные соответственно минимально и максимально возможные значения СИИ (например исходя из диапазона измерения датчика).

3) Натурные СИИ $\{ z(i), i=1, 2, \dots, J \}$, которые адекватно описываются моделью (4).

4) Ограничение на сложность алгоритмов on-line сжатия по техническим условиям их аппаратной и программной реализации, определяемое средним временем сжатия $t_{cж}$ одного отсчета СИИ, которое не должно превышать среднее время обработки t_o одного отсчета СИИ в системе управления:

$$t_{cж} < t_o. \quad (5)$$

Требуется:

Разработать алгоритм сжатия-восстановления на основе кубических сплайнов сглаживающий зашумленный сигнал и адаптирующийся к его изменяющимся свойствам.

Предлагаемый алгоритм сжатия представляет собой процесс выбора из исходной последовательности отсчетов СИИ $\tilde{z}(i)$ таких подмножеств, которые отвечали бы следующему условию: в каждом подмножестве можно найти сглаживающий сплайн $S(i)$, значения которого отличаются от исходного $\tilde{z}(i)$ на величину, не превышающую ε_{max} .

$$|\tilde{z}(i) - S(i)| \leq \varepsilon_{max}. \quad (6)$$

Предлагаемый алгоритм сжатия представлен на рис. 2.

Выбор отсчетов, входящих в первое подмножество начиная с нулевого отсчета (блок 1):

$$i_n = 0. \quad (7)$$

Начальное количество n значений $\tilde{z}(i)$, входящих в подмножество принимается равным пяти (блок 2). Это связано с тем, что кубический сплайн можно провести через любые четыре точки, а значит если $n < 5$, то сглаживания не будет.

Для определения ε_{max} (блок 3) вычисляется средняя разность между соседними отсчетами $\tilde{z}(i)$, входящими в подмножество и умножается на коэффициент k :

$$\varepsilon_{max} = \frac{k}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |\tilde{z}(i) - \tilde{z}(i+1)| \quad (8)$$

Так как ε_{max} зависит от разности между соседними отсчетами $\tilde{z}(i)$, то происходит

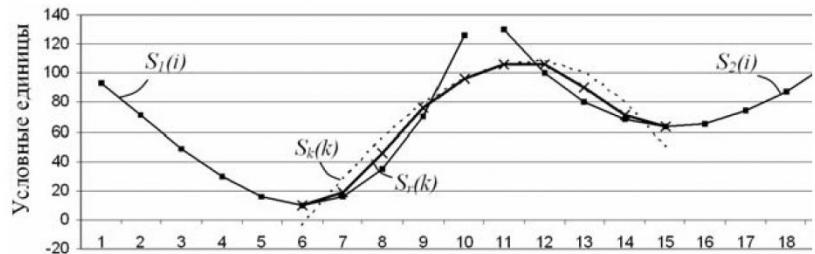


Рис.3. Пример "стыковки" сплайнов $S_1(i)$ и $S_2(i)$

адаптация алгоритма к дисперсии флуктуационной помехи $D(\varepsilon_{\phi})$. Коэффициент k является параметром настройки и его выбор осуществляется на этапе обучения. Чем меньше k , тем меньше будет разница между восстановленным после сжатия сигналом $\hat{z}(t_i)$ и исходным СИИ $\tilde{z}(i)$, также меньше будет коэффициент сжатия $K_{cж}$. Значение коэффициента k следует выбирать таким, чтобы разница между восстановленным после сжатия сигналом $\hat{z}(t_i)$ и полезной составляющей СИИ $\tilde{z}_T(i)$ удовлетворяла условию:

$$|\hat{z}(i) - \tilde{z}_T(i)| \leq \Delta z, \quad (9)$$

где Δz – заданная точность сглаживания.

Результаты моделирования работы описываемого алгоритма показывают что соотношение (9), для различных сигналов, наилучшим образом выполняется при $1,5 < k < 5$.

Для выявления грубых выбросов текущий отсчет сравнивается с соседними (блок 4) и если условие выполняется, то применяется функция "резки" линейного типа (блок 5):

$$\Psi(\tilde{z}(i)) = \begin{cases} \tilde{z}(i-1) + \varepsilon_{max}, \\ \tilde{z}(i) - \tilde{z}(i-1) > 0; \\ \tilde{z}(i-1) - \varepsilon_{max}, \\ \tilde{z}(i) - \tilde{z}(i-1) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Коэффициенты сплайна определяются МНК по формуле (3) на основе значений $\tilde{z}(i)$ (блок 6). Значения сплайна $S(i)$ вычисляются по формуле (2) (блок 7). Если разница между отсчетами сплайна $S(i)$ и сигнала измерительной информации

$\tilde{z}(i)$ больше ε_{max} (блок 8), то запоминаются коэффициенты сплайна и количество отсчетов сплайна (подмножества) на предыдущем шаге (блок 9), в противном случае количество отсчетов увеличивается на одно значение (блок 10) и описанные шаги повторяются, пока условие (блок 8) не выполнится. Таким образом, из последовательности отсчетов $\tilde{z}(i)$ выбирается подмножество, для которого выполняется условие (6), и сами отсчеты заменяются данными:

$$\tilde{z}(T_{cж_v}) = \{a_0, a_1, a_2, a_3, n\}_v, \quad (11)$$

где $T_{cж}$ – интервал сжатия, $T_{cж} = (n_v-1) \cdot \Delta t$; Δt – шаг дискретизации, $v = 1, 2, \dots$

После того как текущее подмножество определено вычисляется номер первого (начального) отсчета i_n для следующего подмножества (блок 11) и работа алгоритма повторяется до тех пор, пока не будет сжат весь СИИ, включая последний отсчет $\tilde{z}(i=J)$. Сжатый и сглаженный сигнал $\tilde{z}(T_{cж_v})$ с выхода блока сжатия поступает на вход ДБД.

Алгоритм восстановления сглаженного сигнала после сжатия состоит из двух этапов:

1) последовательное вычисление отсчетов сплайнов для каждого подмножества;

2) "стыковка" сплайнов на

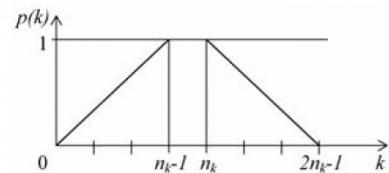


Рис.4. Пример весовой функции $p(k)$

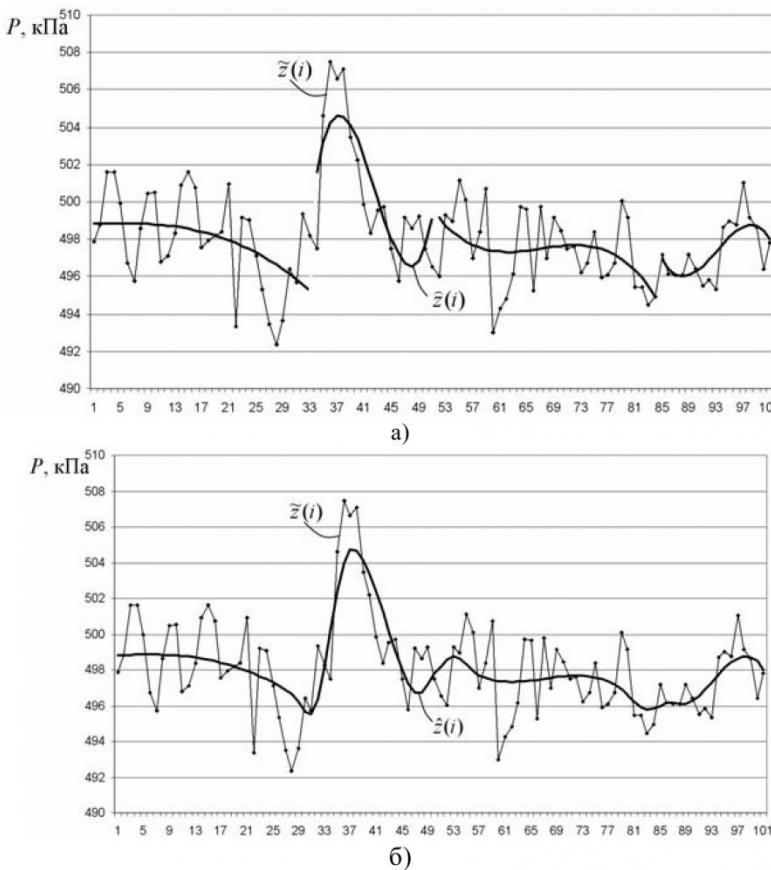


Рис. 5. Исходные и восстановленные после сжатия оценки давления доменного газа в печи

границе подмножеств.

В итоге последовательного вычисления отсчетов сплайнов (2) для каждого подмножества формируется массив данных:

$$\hat{z}(\nu) = \{S_\nu(i) | i = i_h, \dots, (i_h + n)\} \quad (12)$$

На рис. 3 показан пример процедуры "стыковки" сплайнов $S_1(i)$ и $S_2(i)$.

1) Задается длина стыковочного участка n_k , т. е. число

отсчетов на концах смежных сплайнов. В примере $n_k = 5$, т. е. "стыковка" производится по отсчетам с 6 по 10 для $S_1(i)$ и с 11 по 15 для $S_2(i)$.

2) По отсчетам, расположенным на стыковочном участке, по формулам (2) и (3), вычисляется стыковочный сплайн

$$S_k(k), \quad k = 0, 1, \dots, (2n_k - 1).$$

3) Отсчеты, расположенные на стыковочном участке, заменяются на отсчеты функции:

$$\begin{aligned} S_r(k) &= \\ &= S(i) \cdot p(k) + S_k(k) \cdot (1 - p(k)), \end{aligned} \quad (13)$$

где $p(k)$ – весовая функция, изменяющаяся таким образом, что

$$\begin{aligned} p(0) &= p(2n_k - 1) = 0, \\ p(n_k - 1) &= p(n_k) = 1. \end{aligned}$$

Пример функции $p(k)$, изменяющейся на участках от 0 до 1 по линейному закону показан на рис. 4.

Таким образом, в середине стыковочного участка (отсчеты 10 и 11 для примера на рис. 3) функция $S_r(k) = S_k(k)$. По мере приближения к концам стыковочного участка функция $S_r(k)$ приближается к значениям соответствующих отсчетов $S(i)$. Величина n_k является настроенным параметром "стыковки". В результате формируется массив данных восстановленных после сжатия $\hat{z}(i)$:

$$\hat{z}(i) = \hat{z}(\bar{z}(i), S_r(k)). \quad (14)$$

На рис. 5а и 5б показаны фрагменты оценок давления доменного газа в печи: исходные $\bar{z}(i)$, восстановленные после сжатия до $\hat{z}(i)$ и после "стыковки" сплайнов $\hat{z}(i)$. Данные сжимались при $k = 1,8$. Полученный коэффициент сжатия $K_{\text{сж}} = 6,5$.

Испытания на различных СИИ зарегистрированных в системе автоматизации доменной печи № 5 ОАО "НкМК" показали, что $K_{\text{сж}}$ находится в пределе $2,8 \div 67$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение рекуррентных сплайн-функций для обработки речевых и видеосигналов / А. В. Седринский, В. А. Ванде-Кирков, И. А. Буздалина, И. К. Окунева, М. И. Орлова, А. И. Солонина. // Электросвязь. – 1982. – № 2. – С. 60-64.
2. Шелевицький І.В. Методи та засоби сплайн-технологій обробки сигналів складної форми. – Кривий Ріг: Европейський університет, 2002.
3. Гуляев А. И. Временные ряды в динамических базах данных. – М. Радио и связь, 1989.
4. Сизиков В. С. Математические методы обработки результатов измерений: Учебник для вузов. – СПб: Политехника, 2001.

□ Авторы статьи:

Кулаков
Станислав Матвеевич
– докт.техн.наук, проф., зав. каф.
систем автоматизации СиБГИУ
(г. Новокузнецк)

Чичерин
Иван Владимирович
– ст. преподаватель каф. информа-
ционных и автоматизированных
производственных систем

Полетаев
Вадим Алексеевич
– докт.техн.наук., проф., зав. каф.
информационных и автоматизиро-
ванных производственных систем