

# Прогнозирование изменения состояния параметров технического объекта с помощью интеллектуального микропроцессорного модуля

С.И. Клевцов

Технологический институт Южного федерального университета,  
kafmps@tpark.ru

**Аннотация** — Для выполнения прогнозной оценки состояния совокупности параметров технического объекта разработаны модель и методика, ориентированные на использование в интеллектуальных микропроцессорных модулях систем мониторинга и управления. Предложен подход к прогнозированию изменения параметра технического объекта с помощью сглаживающего прогнозирующего кубического сплайна.

**Ключевые слова** — Прогноз, интеллектуальный модуль микропроцессора, сплайн, оценка состояния.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы безопасности эксплуатации сложных технических объектов, предотвращения аварийных ситуаций и техногенных катастроф непосредственно связаны с осуществлением достоверной прогнозной оценки состояния объекта. Прогнозирование возникновения подобных ситуаций, обеспечивающее упреждающее устранение причин их возникновения, необходимо для достижения более устойчивого контроля состояния объекта в целом [1]. Прогнозная оценка состояния параметра объекта, значение которого снимается датчиком, производится путем сравнения его возможного значения с границами установленных для параметра зон [2]. Если значение выходит за пределы нормальной зоны, то фиксируется ситуация, отличная от нормальной, и реализуются действия, направленные на нормализацию параметра.

Разработка и использование в составе систем мониторинга технических объектов современных многофункциональных интеллектуальных микропроцессорных модулей (ИММ) делает постановку и реализацию задачи оценки состояния объекта с их помощью актуальной и своевременной [3]. Как правило, состояние объекта определяется множеством параметров. Поскольку ИММ является многовходовым модулем, который способен снимать и обрабатывать несколько параметров объекта, его можно использовать для оценки совокупности параметров. Если эта совокупность параметров определяет функционирование составной части или объекта в целом, то осуществляемая на базе ИММ оценка совокупности параметров в ре-

зультате даст оценку прогнозируемого состояния объекта или его составной части.

Для предварительной оценки состояния технического объекта целесообразно использование простых моделей, построенных на основе приближенных функциональных зависимостей между переменными объекта, которые могут быть получены как в результате упрощения сложных математических соотношений, представляющих решения интегродифференциальных уравнений [4], так и в результате выявления и анализа экспертных и опытных знаний и данных [5]. Часто такая оценка является достаточной для прогнозирования и предотвращения нештатных и аварийных ситуаций. То, что оценка и меры по предотвращению нештатных и аварийных ситуаций реализуются на нижнем уровне системы мониторинга, обеспечивает высокую динамику реакции на эти ситуации и, как следствие, повышение эффективности системы мониторинга.

## II. СХЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СОВОКУПНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В работе рассматривается построение матричной модели упрощенной предварительной оценки состояния совокупности параметров технического объекта с использованием экспертных знаний и опытных данных и формирование команд по ликвидации и предотвращению возникающих нештатных и нестабильных ситуаций.

В основе модели лежит параметрическое представление технического объекта.

Имеется технический объект  $G$ , характеризуемый параметрами  $p_i \in \{p_i\}_{i=1}^m$ , где  $m$  – количество параметров объекта, контролируемых ИММ.

Для каждого параметра  $p_i$  определены области значений:

- область нормальных значений (ОНЗ)  $q_i^n$ . Если  $p_i \in q_i^n$ , то параметр  $p_i$  находится стабильно в норме;
- область пограничных значений (ОПЗ)  $q_i^g$ . Если  $p_i \in q_i^g$ , то параметр  $p_i$  в допустимых пределах, но его

значение находится близко к границе нормы. Ширина этой области определяется максимально возможной скоростью изменения данного параметра и временем, в течение которого возможна корректировка параметра до пересечения границы нормы;

в) область опасных значений (ООЗ)  $q_i^o$ . Если  $p_i \in q_i^o$ , то параметр  $p_i$  находится вне области нормы, но в зоне, достаточной для того, чтобы с помощью корректирующих действий перевести параметр в нормальную область значений;

г) область аварийных значений (ОАЗ)  $q_i^a$ . Если  $p_i \in q_i^a$ , то находится далеко от границы нормальных области значений. Этот уровень характеризует нештатную ситуацию и требует особых мер реакции.

Введем для параметра  $p_i$  вектор-строку  $\alpha_i$  идентификационных коэффициентов  $\alpha_{ik}$

$$\alpha_i = (\alpha_{i1} \quad \alpha_{i2} \quad \alpha_{i3} \quad \alpha_{i4}),$$

где  $\alpha_{ik}$ ,  $k=1,4$  принимают значения 0 или 1 и показывают принадлежность значения параметра объекта к конкретной области значений:

$\alpha_{i1}$  – характеризует принадлежность значения  $i$ -ого параметра ОНЗ,  $\alpha_{i2}$  – к ОПЗ,  $\alpha_{i3}$  – к ООЗ, а  $\alpha_{i4}$  – к ОАЗ.

Если  $\alpha_{ik} = 1$ , то значение параметра принадлежит к-ой зоне, если  $\alpha_{ik} = 0$  – не принадлежит.

Таким образом, в вектор-строке  $\alpha_i$  один из коэффициентов  $\alpha_{ik}$  всегда равен 1, а три остальных равны 0.

Для предварительной оценки можно ввести следующую градацию состояния объекта, согласованную с областями значений параметров:

нормальное состояние – все параметры находятся в пределах нормы;

пограничное состояние – объект полностью работоспособен, но один или несколько параметров находятся в зоне пограничных значений и, следовательно, объект может перейти в опасное состояние;

опасное состояние – объект в целом работоспособен, но один или несколько параметров находятся в области опасных значений, что может привести к развитию аварийной ситуации. При этом возможно, что некоторые функции, не являющиеся важными, он не сможет выполнять;

аварийное состояние – один или несколько параметров находятся в области аварийных значений, а объект может не выполнять одну или несколько основных функций.

Для оценки состояния технического объекта вводится специальная матрица состояний объекта (МСО), которая формируется из вектор-строк параметров  $\alpha_i$ . МСО может быть связана не со всеми параметрами объекта.

В итоге получим матрицу вида:

$$M = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \alpha_{N3} & \alpha_{N4} \end{pmatrix}.$$

Матрица состояний объекта  $M$  состоит из вектор-строк  $\alpha_i$ ,  $i=1,N$ , где  $i$  – определяет номер вектор-строки в матрице  $M$ ,  $N$  – общее количество параметров, используемое для оценки состояния составной части или объекта в целом.

В матрице  $M$  можно выделить четыре вектор-столбца вида:

$$M_k = \begin{pmatrix} \alpha_{1k} \\ \alpha_{2k} \\ \dots \\ \alpha_{Nk} \end{pmatrix},$$

каждый из которых определяет количество параметров, значения которых принадлежат нормальной, пограничной, опасной или аварийной области, соответственно.

Для каждого из векторов  $M_2, M_3, M_4$  на основе экспертных знаний, опытных данных или результатов моделирования формируется множество тестовых векторов для идентификации возникшей ситуации и определения дальнейших действий по ее разрешению, т.е. множество тестовых векторов для пограничной зоны  $\{R_{2s}\}, s=1, \dots, S$ ; множество тестовых векторов для опасной зоны  $\{R_{3l}\}, l=1, \dots, L$ ; множество тестовых векторов для пограничной зоны  $\{R_{4f}\}, f=1, \dots, F$ .

Структура каждого из тестовых векторов соответствует структуре любого из векторов  $M_2, M_3, M_4$ .

Потенциальное количество тестовых векторов любого из множеств может быть значительным и определяется выражением  $S = \sum_{k=0}^N C_N^k$ , где  $C_N^k$  – число сочетаний из  $N$  по  $k$ .

Однако, в практическом плане количество вариантов команд или последовательностей команд обычно очень невелико. Большинство ситуаций, идентифицируемые различными тестовыми векторами, требуют одной и той же базовой команды или последовательности команд и только некоторые из ситуаций, идентифицируемые небольшим количеством тестовых векторов, требуют команд, отличных от базового набора.

Последовательность проведения текущей и прогнозной оценки состояния совокупности параметров технического объекта выглядит следующим образом.

На начальном этапе анализируются элементы матрицы  $M_1$ .

Если  $\sum_{i=1}^N \alpha_{i1} = N$ , то состояние оцениваемой совокупности параметров – нормальное.

Если  $\sum_{i=1}^N \alpha_{i1} < N$ , то переходим к совместному анализу элементов матриц  $M_1$  и  $M_2$ .

Если  $\sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} = N$ , то состояние пограничное, но все

параметры в допустимых пределах.

Тем не менее, для реализации соответствующей команды, обеспечивающей перевод параметров, попавших в пограничную область, в нормальную область, проводится сравнение вектора  $M_2$  с каждым из векторов множества  $\{R_{2s}\}$ . Каждый из этих тестовых векторов размерностью  $N \times I$  определяет вариант команды или последовательность команд, которые переводят состояние составной части объекта из пограничного в нормальное.

Если  $\sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} < N$ , то анализируются элементы матриц  $M_1$  и  $M_2$  и  $M_3$ .

Если  $\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} = N$ , то состояние составной части объекта – опасное и выполняется сравнение вектора  $M_3$  с каждым из векторов множества  $\{R_{3l}\}$ .

Если  $\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} < N$ , то состояние составной части объекта – аварийное.

После сравнения вектора  $M_4$  с каждым из векторов множества  $\{R_{4f}\}$  определяется команда, которую необходимо реализовать для устранения ситуации.

### III. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СГЛАЖИВАЮЩЕГО КУБИЧЕСКОГО СПЛАЙНА

Для осуществления прогнозной оценки состояния совокупности параметров необходимо знать возможные значения параметров в моменты времени, последующие за текущим значением. Исследования показывают, что для прогнозирования изменения параметра технического объекта можно воспользоваться подходом, основанным на использовании метода сглаживающих кубических сплайнов [6].

Синтез алгоритма для определения коэффициентов сглаживающего прогнозирующего кубического сплайна на равномерной временной сетке может базироваться на методике построения сглаживающего кубического сплайна, изложенной в [7, 8].

Согласно [7] коэффициенты сглаживающего кубического сплайна  $K$  определяются из соотношения в матричном виде

$$(\mu W Y W^T + \frac{1}{6} \Omega) K = W P. \quad (1)$$

В выражении (1)  $\mu$  и  $Y$  нужно подбирать, а матрицы  $W, \Omega$  и вектор  $P$  известны.

Обозначим постоянный шаг измерения значения сигнала по времени при обработке информации в микроконтроллере ИММ, как

$$h_j = h, j=0, 1, 2 \dots L-1, \quad (2)$$

где  $L$  – количество временных точек, в которых производились измерения значений параметра.

При условии (2)

$$h_j^{-1} = \frac{1}{h}, i=0,1,\dots,L.$$

Тогда

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h^{-1} & -2h^{-1} & h^{-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h^{-1} & -2h^{-1} & h^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & h^{-1} & -2h^{-1} & h^{-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Матрица  $\Omega$  для естественных граничных условий [6]:

$$\Omega = \begin{pmatrix} 2h & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 4h & h & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h & 4h & h & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & h & 4h & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 2h \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В выражении (1) с учетом (2) вектора  $P$  и  $Y$  представляются в виде

$$P = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \dots \\ p_L \end{pmatrix}, \text{ где } p_j, j=0,1,\dots,L \text{ измеренные значения}$$

параметра  $p(t)$ ;

$$Y = \begin{pmatrix} \delta_0^{-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \delta_1^{-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \delta_2^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \delta_L^{-1} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Учитывая (3-5) и опуская промежуточные преобразования, из соотношения (1) получим систему уравнений для определения коэффициентов  $K_j, j=0,1, \dots,L$ . Эта система уравнений в матричном виде:

$$UK = Q,$$

где  $K = (K_0, K_1, \dots, K_L)^T$ ;

$$U = (\mu W Y W^T + \frac{1}{6} \Omega);$$

$$Q = W P.$$

Решение матричного уравнения осуществляется известными методами, например, методом Гаусса или методом прогонки [9].

Если вектор  $K$  найден, то на следующем этапе можно «уточнить» значения измеренных ранее значений функции  $p(t)$ , т.е. уточнить значения  $p_j, j=1, \dots, L$ .

Построив по уточненным значениям, обозначим их  $p_j^*$ , обычный интерполяционный сплайн, получим фактически прогнозирующий сплайн, который можно использовать для вычисления прогнозных значений функции  $p(t)$  при  $t > t_L$ .

Поскольку интерполяционный сплайн по уточненным значениям  $p_j^*$  используется для прогнозирования, то важно построить сплайн на последних участках области измерения функции  $p(t)$ .

По аналогии с [7], получим

$$P^* = P - \mu Y W^T K,$$

где  $P^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_L^*)^T$ .

Используя разработанную методику построения сглаживающего прогнозирующего сплайна, основанную на теоретических положениях, представленных в [7, 8], и опуская вычисления, можно получить соотношение для вычисления параметра технического объекта в моменты времени, следующие за текущим моментом, при котором сделано последнее измерение параметра:

$$p(t) = p_{j+1}^* \cdot (m+1) - p_j^* \cdot m + \frac{h^2}{6} [K_{j+1} \cdot (m+1)((m+1)^2 - 1) - K_j m(m^2 - 1)],$$

где  $p(t)$  – значение параметра в момент времени  $t = t_{j+1} + mh, m \geq 1$ ;

$p_j^*$  – сглаженные значения параметра  $p$ ;

$K_j$  – коэффициенты, определяющие сглаживающий прогнозирующий сплайн.

#### IV. СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СОВОКУПНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО МОДУЛЯ

Для реализации методики оценки состояния совокупности параметров объекта с помощью многовходового ИММ в реальном времени необходимо адаптировать основные элементы методики к особенностям цифровой обработки данных в микроконтроллере.

Формирование вектор-столбцов  $M_1, M_2, M_3$  и  $M_4$  осуществляется в рамках цикла опроса датчиков физических величин.

Каждый вектор-столбец представляет собой слово разрядности не ниже  $N$ . Каждая позиция в слове закреплена за опрашиваемым параметром объекта.

Перед опросом датчиков все четыре вектор-столбца обнуляются, т.е. обнуляются соответствующие слова. В процессе снятия и определения принадлежности текущего или прогнозного значения параметра той или иной области в один из индикаторов  $i$ -го параметра записывается величина 1, в остальные – 0.

Эти значения формируют вектор-столбцы  $M_1, M_2, M_3$  и  $M_4$ . Фактически значения вносятся в соответствующие разряды слов, отображающих вектор-столбцы в памяти контроллера ИММ.

После считывания и обработки  $N$ -го параметра все вектор-столбцы обновлены и готовы для анализа.

Таким образом, при реализации в микроконтроллере сравнение вектор-столбца с массивом тестовых векторов соответствующего уровня сводится к сравнению чисел. Совпадение определяет команду, которая формируется и передается микроконтроллером ИММ на исполнительные устройства. При отсутствии совпадения чисел в действие вводится режим «по умолчанию», в соответствии с которым формируется и передается базовая команда для данного типа ситуации.

Методика очень проста и позволяет реализовать прогнозную оценку состояния совокупности параметров объекта и управление ситуациями в реальном времени с помощью многовходового ИММ в составе распределенной микрокомпьютерной системы мониторинга, что важно для оперативного мониторинга и управления объектом в реальном масштабе времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пьявченко О.Н., Клевцова А.Б. Алгоритм оценки и прогнозирования поведения переменной состояния объекта / Материалы международной научной конференции "Системный подход в науках о природе, человеке и технике". Часть 5. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – С.77-86.
- [2] Клевцова А.Б. Интегральная оценка состояния объекта мониторинга // Известия ТРТУ. №2(37). 2004. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – С.58-66.
- [3] Пьявченко О.Н. Концептуальное представление о прецизионных интеллектуальных микропроцессорных модулях ввода, измерений и обработки аналоговых сигналов // Известия ТРТУ. №3 (75). 2007. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – С.3-13.
- [4] Васильев В.В. Современные проблемы компьютерного мониторинга в энергетике // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001, № 3. – С.99-120.
- [5] Пьявченко О.Н., Горелова Г.В., Боженюк А.В., Клевцов С.И., Клевцова А.Б. Методы и алгоритмы моделирования развития сложных ситуаций: Монография / Под ред. д.т.н., профессора О.Н. Пьявченко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 157 с.
- [6] Кочегурова Е.А., Шебеко Е.В. Использование вариационного сглаживающего сплайна в задаче краткосрочного прогнозирования // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т.309. №7 – С.36-39.
- [7] Квасов Б.И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами. – М.: Физматлит, 2006. – 360 с.
- [8] Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошничков В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 382 с.
- [9] Мэттьюс Дж.Г., Финк Куртис Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.