

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

© 2007 г. М.В. Прищепа

**Ростовский государственный университет путей сообщения**

Предметом настоящего исследования является система технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Согласно [1] структура распределенной СТДМ устройств ЖАТ должна строиться по иерархическому принципу с выделением следующих уровней: уровень линейного пункта (станция, перегон), уровень дистанции и уровень дороги. На каждом из этих уровней можно выделить подсистемы, снабженные специализированным математическим обеспечением: подсистема сбора данных (на уровне линейного пункта), подсистема предварительной обработки (на уровне линейного пункта), подсистемы интеллектуального анализа (на уровне дистанции и дороги).

Подсистема сбора данных обеспечивает систему мониторинга, а именно подсистему предварительной обработки, исходной информацией об устройствах: состояние реле, измерение напряжений, токов, сопротивлений и т.д.

Основными задачами подсистемы предварительной обработки данных являются: выявление мгновенных технологических операций, отказов, предотказов устройств ЖАТ, а также запись протоколов событий и передача информации в подсистему анализа.

Подсистема интеллектуального анализа данных строится на основе хранилища данных и организует анализ ситуаций, выявленных в подсистеме предварительной обработки, на основе накопленных знаний и истории работы устройств.

### **Математическое обеспечение подсистемы сбора данных**

Результаты измерений параметров устройств СЦБ средствами измерительно-вычислительного комплекса, входящего в состав исследуемой СТДМ, в большинстве случаев считаются зависимыми только от величины оцениваемого параметра (прямые измерения), при этом ошибка модели учитывает влияние

остальных параметров, например, температуры. Но среди всех измерений выделяются измерения сопротивления изоляции, определяемые по току выхода сигнализаторов заземления индивидуальных (СЗИ-1, СЗИ-2), повсеместно применяемых на сети железных дорог России. Анализ работы этих устройств показал, что ток выхода зависит не только от сопротивления изоляции контролируемой цепи, но и от напряжения в цепи. Таким образом, математическую модель измерений можно представить в виде:

$$\tilde{R}_i = f(R, U) + \xi_i, i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $\tilde{R}_i$  – измеренное сопротивление с выхода СЗИ,

$R$  – истинное сопротивление изоляции контролируемой цепи,

$U$  – напряжение в контролируемой цепи,

$f$  – некоторая функция, отражающая искажение, вносимое устройством СЗИ,

$\xi_i$  – суммарная ошибка измерения и модели,

$N$  – общее число измерений.

Основная задача заключается в определении оценки  $\hat{R}$  параметра  $R$ , которая существенным образом зависит от двух параметров –  $R$  и  $U$ .

Для определения вида функции  $f$  была проведена серия измерений с использованием эталонных напряжений ( $U_i, i = 1, 2, \dots, n$ ) и сопротивлений ( $R_j, j = 1, 2, \dots, m$ ), формируемых калибратором. Пусть  $\tilde{R}_{ij}$  – результат измерения при напряжении  $U_i$  и сопротивлении изоляции  $R_j$ . По результатам измерений было отмечено, что зависимость разности истинных значений сопротивления и измеренных значений ( $R_j - \tilde{R}_{ij}$ ) от напряжений  $U_i$  близка к линейной. С помощью метода наименьших квадратов были получены линейные функции, которые наилучшим образом аппроксимируют имеющиеся измерения:

$$R_j - \tilde{R}_{ij} \approx A_j U + B_j, j = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

При этом нормированные коэффициенты регрессии близки к единице, что подтверждает линейную функциональную зависимость.

Полученные коэффициенты линейной аппроксимации (1) зависят только от одного параметра  $R$ , и при этом эта зависимость близка к линейной. Повторно пользуясь методом наименьших квадратов, были получены линейные функции, которые наилучшим образом аппроксимируют имеющиеся значения коэффициентов  $A_j$  и  $B_j$ :

$$A \approx a_1 R + a_0, B \approx b_1 R + b_0,$$

При этом нормированные коэффициенты регрессии близки к единице, что подтверждает линейную функциональную зависимость. Таким образом, относительная погрешность измерения сопротивления изоляции с выхода СЗИ можно представить в следующем виде:

$$\delta R_i = R - \tilde{R}_i = (a_1 R + a_0)U + (b_1 R + b_0) + \xi_i, i = 1, 2, \dots, N.$$

В качестве значения напряжения в цепи будем использовать измеренное значение  $\tilde{U}_i$ . В результате получим следующую модель косвенных измерений:

$$R = \tilde{R}_i + (a_1 R + a_0)\tilde{U}_i + (b_1 R + b_0) + \eta_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где  $\eta_i$  – суммарная ошибка измерений и модели, учитывающая погрешность измерения напряжения.

Для последовательности измерений  $\tilde{R}_i, i = 1, 2, \dots, N$ , оценка  $\hat{R}$  рассчитывается по методу наименьших квадратов из условия минимизации ошибки  $\eta_i$ :

$$\hat{R} = \arg \min \sum_{i=1}^N \left( \tilde{R}_i + (a_1 \hat{R} + a_0)\tilde{U}_i + (b_1 \hat{R} + b_0) - \hat{R} \right)^2.$$

Решение этой задачи может быть найдено путем приравнивания нулю производной по  $\hat{R}$  от минимизируемой величины. В результате решения уравнения получим:

$$\hat{R} = - \frac{\sum_{i=1}^N \left[ (\tilde{R}_i + a_0 \tilde{U}_i + b_0) (a_1 \tilde{U}_i + b_1 - 1) \right]}{\sum_{i=1}^N (a_1 \tilde{U}_i + b_1 - 1)^2}.$$

Полученная модель **Ошибка! Источник ссылки не найден.** позволяет даже для одного измерения ( $N = 1$ ) уменьшить абсолютную погрешность оценки  $\hat{R}$  в три, а в некоторых случаях и в пятнадцать раз (с 22% до 1.5%). На основе модели **Ошибка! Источник ссылки не найден.** была разработана методика калибровки устройств ввода, исследуемой СТДМ.

### Математическое обеспечение подсистемы предварительной обработки данных

Одной из самых сложных задач подсистемы предварительной обработки данных является разработка адаптивных методов диагностирования. Основные проблемы в этой области связаны со сложной электромагнитной обстановкой, влияющей на точность средств измерений, и с тем, что диагностические со-

стояния большинства устройств слабо формализованы. Характерными примерами являются задачи диагностирования стрелочных электродвигателей (ЭД) и рельсовых цепей (РЦ).

В настоящем исследовании для диагностирования слабо формализуемых процессов, протекающих при работе отдельных функциональных устройств или групп устройств, предлагается использовать принципы, основанные на нечетких темпоральных отношениях [2]. При этом выделяется конечный перечень измеряемых параметров  $\{p_i\}_{i=1}^N$ , используемых при классификации работоспособности устройства или группы устройств. В качестве измеряемых параметров могут выступать такие показатели как напряжение, сила тока, а также параметры, имеющие дискретные состояния: положение контроля стрелки, состояние управления стрелкой, занятость рельсовой цепи и т.п. Для анализа динамики изменения нескольких параметров вводится комплексный метод качественного нечеткого описания, являющийся обобщением метода, описанного в [3]. Для каждого параметра  $p_i$  задается в общем случае нечеткое отображение  $P_i$ , действующее из множества значений параметра  $p_i$  в соответствующее базовое терм-множество лингвистических значений  $L_{p_i} = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ , а также нечеткое отображение  $\Delta P_i$ , действующее из множества всех возможных изменений параметра  $p_i$  в терм-множество  $L_{\Delta p_i} = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}\}$ . Кроме того, задается нечеткое отображение  $T$ , действующее из множества всех возможных периодов времени (длительностей) в терм-множество  $L_t = \{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ik}\}$ .

В рамках заданных лингвистических значений набор правил классификации представляется как ориентированный помеченный граф. Подобная схема представления знаний была предложена в [4]. Вершины задают нечеткие высказывания над множествами  $L_{p_i}$  с применением множества нечеткологических операций  $O = \{\&, \vee, \circ, \neg\}$  и являются нечеткими описаниями состояния параметров в совокупности. Дуги являются переходом между парой состояний, задавая нечеткое темпоральное событие. Оконечные вершины (не имеющие исходящих дуг) также являются решениями о классификации анализируемого процесса. Нечеткие темпоральные события, заданные дугами, являются нечеткими конъюнкциями длительности перехода, заданной нечетким высказыванием над множеством  $L_t$ , со значением нечеткого высказывания над множествами  $L_{\Delta p_i}$ , задающего описание характера изменения параметров.

В целом база знаний представляет собой набор деревьев нечеткого качественного развития событий. Выбор набора правил для последующего анализа процесса осуществляется при удовлетворении условию на состояние параметров, заданного корнем соответствующего дерева. Т.о., полученную базу знаний можно сравнить с нечеткими деревьями решений. Основным отличием является то, что деревья решений применяются для анализа законченной ситуации по фиксированному количеству признаков. В предлагаемом же подходе оценивается развитие ситуации, что позволяет применять его в режиме реального времени.

Нечетко-логический вывод по описанным правилам осуществляется согласно следующему алгоритму:

1. Пусть в настоящий момент исследуемое устройство или группа устройств имеют следующие значения анализируемых параметров:  $p_{i0}, i=1...N$ . Вычисляются значения нечетких высказываний  $E_j = E_j(P_1(p_{10}), P_2(p_{20}), \dots, P_N(p_{N0}))$  всех корней групп правил из базы знаний. Если  $E_j > 0$ , то корень выбирается для дальнейшего анализа с параметром глубины  $G_j = 0$  и достоверностью  $D_j = E_j$ .

2. Пусть теперь имеется  $k$  выбранных вершин графов развития событий  $\{V_1, \dots, V_k\}$ . Каждая вершина  $V_j$  с параметром глубины  $G_j$ , достоверностью  $D_j$  и временем  $t_j$  имеет  $j_n$  дуг, задающих нечеткие темпоральные события  $\{E_{j_1}, \dots, E_{j_n}\}$ . Для каждого нового значения параметров  $\{p_{ij}\}$  и длительности  $\Delta t_j$  с момента выбора вершины  $V_j$  вычисляются значения нечетких высказываний  $E_{j_s} = E_{j_s}(T(\Delta t_j), \Delta P_1(\Delta p_{1j}), \dots, \Delta P_N(\Delta p_{Nj}))$  всех дуг, исходящих из вершины  $V_j$ . Если  $\forall \Delta t_j E_{j_s} = 0$ , то дуга  $j_s$  исключается из анализа. Для остальных дуг выбирается  $\Delta t_{j_s}$ , при котором  $E_{j_s}$  достигает максимального значения, и затем значения параметров в момент времени  $t_j + \Delta t_{j_s}$  подставляются в нечеткое высказывание следующей вершины. Если результат  $(E | E_{j_s})$  больше нуля, то эта вершина выбирается для дальнейшего анализа с параметром глубины  $G_j + 1$  и достоверностью равной  $\min\{D_j, \max\{E_{j_s}\}, E | E_{j_s}\}$ , иначе вершина исключается из анализа.

3. Если выбранная вершина  $V_j$  является конечной, то считается, что процесс относится к соответствующему классу  $C_j$  с достоверностью  $D_j$  по  $G_j$  нечетко-темпоральным событиям.

4. Окончательное решение о классификации процесса принимается путем выбора класса, имеющего максимальную достоверность.

Описанный подход имеет ряд преимуществ по сравнению, например, с часто применяемыми для классификации графиков изменения параметров методами, основанными на использовании искусственных нейронных сетей. Механизмы метода качественного нечеткого описания являются интуитивно понятными. В отличие от нейронных сетей этот метод может быть использован в режиме реального времени, что очень важно именно в подсистеме предварительной обработки данных. Он не требует значительных вычислительных ресурсов и памяти, как нейронные сети, добавление нового правила не требует переобучения. Значения параметров в вершинах выбранного пути, а также длительности переходов могут быть использованы для дополнительного анализа: определение длительности различных стадий, определение значений параметров в ключевых стадиях и т.п. Конечно, в этом подходе тоже есть сложные моменты. Основной трудностью является определение функций принадлежности значений из базовых терм-множеств. Необходимо заметить, что требуется их определять не только для каждого типа устройств, но и, возможно, для каждого устройства в отдельности с целью учета его индивидуальных особенностей. Но, однако, это не повлечет изменения базы знаний.

### **Математическое обеспечение подсистемы интеллектуального анализа**

Анализ процесса движения поездов и действий оперативного персонала отличается от диагностирования отдельного устройства тем, что, как правило, решение о классификации необходимо выдвинуть для каждого нового события удовлетворяющего некоторым условиям, а не для последовательности событий в целом. Например, при проявлении сбоя некоторого устройства необходимо решить является ли этот сбой результатом проведения ТО или нет. Подобные алгоритмы удобно реализовывать в подсистеме интеллектуального анализа, построенной на основе хранилища архива событий.

Для анализа последовательностей событий для различных устройств необходимо введение темпоральных отношений не только в будущее, но и в прошлое. Кроме того, требуется возможность задания цикличности темпоральных событий, т.к. количество устройств, по которым проводится техническое обслуживание, а значит количество событий, не фиксировано.

Итак, набор правил описания развития и истории событий представляется как ориентированный помеченный граф с заданной корневой вершиной. Вершины графа задают нечеткие ситуации (нечеткие высказывания над пространством ситуаций). Дуги графа задают нечеткие темпоральные отношения между нечеткими ситуациями. Дуги, исходящие из корневой вершины, делятся на темпоральные отношения в прошлое и темпоральные отношения в будущее. Вершины, переход к которым осуществлен по дугам в будущее, имеют исходящие дуги только в будущее, а вершины, переход к которым осуществлен по дугам в прошлое, имеют исходящие дуги только в прошлое. Такой граф, задающий набор правил может не являться деревом, задавая циклы развития событий или истории событий. Оконечные вершины (не имеющие исходящих дуг) являются решениями о классификации анализируемого процесса.

Нечетко-логический вывод осуществляется по принципам нечетко-логического вывода для комплексного качественного нечеткого описания с небольшими корректировками, связанными с возможностью циклов и анализа истории событий для корневой вершины.

Предложенные методы диагностирования устройств, а также классификации событий по их проявлению во времени позволит повысить достоверность диагностирования, и обеспечить адаптивный анализ процесса движения поездов и действий оперативного персонала. Что в свою очередь позволит решать задачи АСУ-Ш-2 по повышению эффективности функционирования хозяйства СЦБ за счет обеспечения полноты и достоверности оперативной информации.

#### Литература

1. Руководящий документ РД 1115842.07-2004 «Системы технического диагностирования и мониторинга. Эксплуатационно-технические требования», утвержденные ЦШ ОАО «РЖД» от 10.08.2004г.
2. *Ковалев С.М., Швалов Д.В.* Нечетко-темпоральные модели анализа сложных динамических процессов в реальном времени // Актуальные проблемы развития технических средств и технологий железнодорожной автоматики и телемеханики: Междунар. межвуз. сборник науч. тр. Ростов н/Д: РГУПС, 2003. С.47-52.

3. *Прищепя М.В., Розаренов А.В.* Диагностирование напольных устройств СЦБ по осциллограммам аналоговых параметров // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр. молодых ученых, аспирантов и докторантов / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Н. Гуды; Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2005. С.161-166.
4. *Ковалев С.М., Долгий А.И.* Модель представления и обработки нечетко-временной информации о последовательных событиях в слабо формализованных динамических процессах // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы, № 3 (19), 2004, <http://pitis.tsure.ru/>