

А. В. Гулай, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by, В. М. Зайцев, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Цифровой контроль тенденций изменения сенсорных параметров в интеллектуальных системах

Текущие состояния мехатронных систем и состояния объектов управления в каждом цикле функционирования обычно оцениваются с помощью набора значений контролируемых параметров, которые формируются измерительными трактами системы на основании сигналов сенсоров. В настоящее время в мехатронике широко применяются методы анализа трендов изменения системных параметров и контроля их нахождения в границах предупредительных и аварийных интервалов. Однако это обеспечивает выявление фактов развития уже сформировавшихся негативных тенденций, когда требуется незамедлительное принятие экстренных управленческих решений и технических мер по предотвращению аварийных ситуаций. Более эффективное управление может быть реализовано при ранней оценке динамики развития событий, что крайне важно для мехатронных систем, в которых имеет место сравнительно быстрое протекание системных процессов. В связи с этим рассмотрено циклическое использование трехшагового процесса непрерывного динамического отслеживания временных рядов контролируемых параметров и применение аппарата нечеткой логики с кодовой фазификацией для принятия оперативных решений о выявлении негативной направленности трендов на каждом из пяти последовательных интервалов наблюдения. Выработка в мехатронной системе решений об устойчивости нарастания или убывания отдельных параметрических трендов или о наличии трендовых флэтов может осуществляться с помощью конечного набора продукционных правил, которые образуют последовательную структуру логических выводов. В логическом отношении наиболее просто процедуры отслеживания миграций параметров и продукционные правила выработки решений реализуются на процессорах, которые поддерживают операции с плавающей точкой и логические поразрядные операции.

Ключевые слова: интеллектуальная система, сенсорный контроль, цифровое управление, миграция параметров, тренд краткосрочный

Введение

Состояния интеллектуальных, в том числе мехатронных, систем и объектов управления в каждом цикле функционирования обычно оцениваются с помощью текущих значений контролируемых параметров, которые формируются измерительными трактами системы на основании сигналов сенсоров. Задание состава контролируемых параметров и пределы требуемых допусков определяются проектировщиками и экспертами на стадии разработки интеллектуальной системы. Используемые в настоящее время методы построения и анализа трендов миграции сенсорных параметров и введения границ предупредительных и аварийных интервалов их изменения обеспечивают выявление фактов развития уже сформировавшихся негативных тенденций, когда требуется незамедлительное принятие экстренных управленческих решений и технических мер по предотвращению аварийных ситуаций.

Более эффективное управление работой системы может быть реализовано при оценке динамики развития событий на ранней стадии формирования тренда миграции параметров. Проблема создания интеллектуальных методов оперативного контроля трендов миграции

системных параметров обусловлена необходимостью выявления тенденций опасного приближения их значений к границам запрещенных областей и выхода в эти области, характеризующие аварийные и катастрофические ситуации. Для реального снижения уровня уязвимости производственно-технологических процессов и опасности возникновения аварий объективно требуется решение задачи непрерывного отслеживания траекторий миграции текущих значений критических параметров оборудования и внешней среды. В процессе контроля трендов миграции системных параметров необходимо принятие адекватных управленческих мер при выходе указанных значений за допустимые пределы.

Некоторые аспекты обсуждаемой проблемы рассматриваются в теории наблюдения, фильтрации и апостериорной обработки параметров случайных процессов. Основные положения этой теории нашли практическое применение, прежде всего, в системах автоматического сопровождения движущихся объектов [1–3]. В традиционной постановке данной задачи требуется в реальном масштабе времени реализовать многошаговый циклический процесс построения траектории по ограниченному числу дискретных измерений текущих коор-

динат. Решение этой задачи осложняется тем, что траектории движения объектов не предполагают их априорную известность, а наблюдения проводятся в условиях влияния случайных факторов на оценку координат пространственного положения. Разнообразные негативные явления могут приводить к существенным потерям координатной информации в отдельных циклах измерений [4, 5].

Исследования по теории катастроф привели к выделению и спецификации нескольких математических моделей развития катастрофической ситуации, которые различаются типами бифуркационных процессов [6—9]. Общетеоретическая классификационная значимость и математическая ценность полученных результатов неоспорима, однако эти конкретные закономерности трудно применимы в инженерном проектировании. Причины этого кроются в том, что выводы и заключения относительно динамики реальных угроз не могут быть отнесены ни к категории четких, ни к разряду вероятностных. При этом можно говорить только о некоторой степени уверенности в правомочности выводов и оценок в зависимости от доверия к знаниям экспертов и от фактических ситуаций, складывающихся на рассматриваемых интервалах времени.

Следует отметить, что при использовании быстродействующих вычислительных средств с большими объемами оперативной памяти имеются объективные технические предпосылки для оперативного отслеживания траекторий миграции значений критических параметров и контроля за их приближением к границам запрещенных областей. Нарращивание арсенала разнообразного электронного оборудования цифровой автоматики и коммуникаций, аппаратно-программных средств обработки информации, обладающих свойствами искусственного интеллекта, позволяют одновременно выявлять зарождение аварийно опасных тенденций в возможной миграции значений критических параметров. Интеллектуальные компоненты при этом должны обладать способностью к рациональному функционированию в условиях действия НЕ-факторов (неполноты состава и неточности числовых данных, неустойчивости признаков событий и их возможных последствий, недостаточной строгости правил поведения и управления).

Интеллектуальная технология контроля тенденций изменения сенсорных параметров

Для семантического описания техногенных аварий на макроструктурном уровне эффективно применение дерева сценариев, в корневых вершинах которого размещаются возможные причины аварий. Ветвям дерева сценариев соответствуют ожидаемые варианты развития событий, отражающие в хронологическом порядке вовлекаемые в аварию составные части и процессы рассматриваемого объекта и его окружения, складывающиеся ситуации, защитные мероприятия персонала, результаты действий и наступившие последствия. Дерево сценариев, по сути, отображает концептуальную схему предметной и проблемной областей аварии, которые основываются на суждениях экспертов, их опыте и интуиции.

Концептуальная схема и дерево сценариев на этапе предварительного анализа задачи позволяют выделить макросостояния аварийно опасного объекта в виде некоторого множества $\{X_j(t)\}$, где $j = 1, 2, \dots, n$; n — число макросостояний объекта; t — время. Отдельные макросостояния естественно оценивать совокупностями текущих значений контролируемых параметров (характеристик) α внутренних микросостояний, которые трактуются как координаты вектора $X_v(t)$:

$$X_v(t) = [\alpha_{v1}(t), \alpha_{v2}(t), \dots, \alpha_{vr}(t), \dots, \alpha_{vR}(t), \dots, \alpha_{va}(t), \alpha_{vb}(t), \dots],$$

где v — указатели параметров внутренних микросостояний объекта; R — число критических параметров.

Значения каждой координаты характеризуют возможные микросостояния объекта. Они соответствуют тем или иным аспектам протекания внешних и внутренних процессов и формируются измерительными трактами на основании сигналов сенсоров. Точность представления контролируемых параметров зависит от чувствительности сенсоров, характеристик трактов измерения, достоверности передачи информации по системным каналам, технической надежности аппаратуры, алгоритмов оцифровки и обработки данных. Для каждого макросостояния $X_j(t)$ некоторое число R координат вектора соответствует критическим параметрам (характеристикам). Состав критических параметров определяется шкали-

рованием мнений экспертов и последующим обобщением экспертных оценок.

На стадии системного анализа целесообразно полагать координаты вектора взаимно независимыми, что соответствует наихудшим условиям оценки энтропии возможных состояний объекта. Для оценки возможных микросостояний по каждому из параметров или характеристике объекта необходимо задать пределы (границы) допусков безаварийного функционирования:

$$\alpha_{vz}(t) \in (\alpha_{vz\text{ н}}, \alpha_{vz\text{ в}}),$$

где $\alpha_{vz\text{ н}}, \alpha_{vz\text{ в}}$ — требуемый нижний и верхний пределы допуска параметра $\alpha_{vz}(t)$ для $z = 1, 2, \dots, R$ [10]. Определение указанных пределов достигается расчетным или экспертным путем.

В состав вектора $X_v(t)$ должны включаться существенные параметры (в терминологии У. Р. Эшби — только "главные параметры"). Состав контролируемых параметров и пределы требуемых допусков могут быть заданы исключительно экспертами — высококвалифицированными системными аналитиками в области создания и использования интеллектуальных мехатронных систем конкретного функционального назначения. Набор ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах требуемых допусков устанавливается путем моделирования процессов формирования и получения блоком цифрового управления вектора $X_v(t)$.

Исходной информацией для выявления тенденций в изменении параметров являются временные ряды в виде последовательности наблюдений в дискретные моменты времени одной или нескольких координат случайного вектора $X_v(t)$ [11, 12]:

$$\{\alpha_{vz}(t) \in (\alpha_{vz\text{ н}}, \alpha_{vz\text{ в}})\}; \\ t = t_0 + k\Delta t; k = 0, 1, 2, \dots; \Delta t \leq 1/2f_{\max}.$$

Здесь $f_{\max}$ — частота дискретизации параметров, значение которой в соответствии с теоремой Котельникова — Найквиста принято в системе в качестве граничного для спектральных разложений координат вектора $X_v(t)$.

Наблюдения координат в дискретные моменты времени t образуют k -е уровни их трендов. Каждый уровень формируется под воздействием большого числа факторов, которые традиционно разделяются на следующие группы:

- факторы, определяющие преобладающую тенденцию (собственно тренд);
- факторы, приводящие к циклическим колебаниям ряда;
- случайные факторы.

В большинстве случаев для каждой компоненты $\alpha_{vz}(t)$ k -й уровень ее временного ряда можно представить как некоторую аддитивную комбинацию трендового, циклического и случайного компонентов.

Классической задачей анализа трендов является прогнозирование на его основе развития контролируемого процесса. С этой целью, как правило, применяется хорошо апробированная, но достаточно громоздкая схема исследований, предполагающая графическое представление и описание поведения уровней рассматриваемых временных рядов, выделение и использование закономерных (неслучайных) составляющих, сглаживание и фильтрацию параметров, исследование случайных составляющих и построение схемы прогнозов [11, 12]. В мехатронных системах, для которых характерны быстропротекающие процессы, практическое значение при выработке управленческих решений имеют краткосрочные тренды. Для их оперативного выявления целесообразно применение существенно иной схемы анализа изменений координат векторов $X_v(t)$.

Предлагается использовать n -шаговый процесс непрерывного динамического отслеживания отдельных временных рядов $\alpha_{vz}(t)$ контролируемых координат векторов $X_v(t)$ и применение аппарата нечеткой логики для принятия оперативных решений о выявлении трендов на каждом из m последовательных интервалов наблюдения, "скользящих" по оси времени. Анализ научно-технических источников и практический опыт построения сложных системотехнических комплексов показывает, что для рассматриваемого случая интеллектуальных мехатронных систем наиболее приемлемы значения n и m не выше $n = 3, m = 5$, поскольку их увеличение не приводит к существенному повышению точности прогноза. При этом

$$(t_i; t_{i+1} = t_i + \Delta t); (t_{i+1}; t_{i+2} = t_i + 2\Delta t); \dots; \\ (t_{i+4}; t_{i+5} = t_i + 5\Delta t)$$

для $i = 0; 1; 2; 3; \dots$

За основу выработки решений принимают результаты линейного аналитического сгла-

живания фактических измерений параметра $\alpha_{vz}(t)$ в четырех смежных отсчетах:

$$\begin{aligned} & \alpha_{vz}(t_i); \alpha_{vz}(t_i + 1); \alpha_{vz}(t_i + 2); \alpha_{vz}(t_i + 3); \\ & \alpha_{vz}(t_i + 1); \alpha_{vz}(t_i + 2); \alpha_{vz}(t_i + 3); \alpha_{vz}(t_i + 4); \\ & \alpha_{vz}(t_i + 2); \alpha_{vz}(t_i + 3); \alpha_{vz}(t_i + 4); \alpha_{vz}(t_i + 5). \end{aligned}$$

Рассмотрим традиционный процесс аналитического сглаживания фактических измерений некоторой координаты α_{vz} вектора X_v при условии, что ошибки измерений распределены по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением σ_{vz} . Для сглаживания выбраны четыре смежных отсчета, потому что это минимальное число отсчетов, которое позволяет достаточно обоснованно выявить локальную тенденцию целенаправленной миграции значений параметра $\alpha_{vz}(t)$. Воспользуемся методом линейного аналитического сглаживания; в этом случае на интервале времени $(t_i, t_i + 3 = t_i + 3\Delta t)$ сглаживающая зависимость будет иметь следующий вид [13]:

$$A_{vz}(t_i, t) = [K_{\alpha}/D_i]t + M_{\alpha} - [K_{\alpha}/D_i]M_i.$$

Оптимальные коэффициенты данного выражения выводятся на основе метода наименьших квадратов. При этом расчеты среднего значения M_i и дисперсии D_i времени t , дисперсии координаты M_{α} и коэффициента корреляции K_{α} для четырех смежных отсчетов могут выполняться по соотношениям, достаточно простым в части состава операций и коротким по времени реализации:

$$\begin{aligned} M_i &= t_i + 1,5\Delta t; \\ D_i &= 1,25\Delta t^2; \\ M_{\alpha} &= [\alpha_{vz}(t_i) + \alpha_{vz}(t_i + \Delta t) + \\ &+ \alpha_{vz}(t_i + 2\Delta t) + \alpha_{vz}(t_i + 3\Delta t)]/4; \\ K_{\alpha} &= \Delta t[-0,375\alpha_{vz}(t_i) - 0,125\alpha_{vz}(t_i + \Delta t) + \\ &+ 0,125\alpha_{vz}(t_i + 2\Delta t) + 0,375\alpha_{vz}(t_i + 3\Delta t)]. \end{aligned}$$

Если локальная тенденция действительно имеет место и отражается зависимостью $A_{vz}(t_i, t)$, то при нормальном распределении ошибок измерений каждое из значений $\alpha_{vz}(t_i)$; $\alpha_{vz}(t_i + 1)$; $\alpha_{vz}(t_i + 2)$; $\alpha_{vz}(t_i + 3)$ с вероятностью не ниже $p = 0,997$ должно находиться внутри зоны тренда

$$\alpha_{vz}(t) \in A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i, t) \pm 3\sigma_{vz}.$$

Этот признак целесообразно использовать в качестве критерия выявления локальной тен-

денции нарастания ($K_{\alpha} > 0$), убывания ($K_{\alpha} < 0$) или слабой изменчивости ($K_{\alpha} \approx 0$) по времени координаты $\alpha_{vz}(t)$ при доверительной вероятности события $P_{\text{дов}} = p^4 = 0,988$.

В случае если локальная изменчивость по времени координаты $\alpha_{vz}(t)$ проявляется достаточно слабо, то модуль коэффициента корреляции K_{α} оказывается крайне малым или вообще $K_{\alpha} \rightarrow 0$. В системах контроля данных такая ситуация называется флэтом (боковым трендом). При техническом анализе на основе экспертных оценок необходимо задать некоторое пороговое значение $K_{\text{флэт}}$, ниже которого принимается решение о наличии флэта, если $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$. Выявление локального флэта или отсутствия выраженной локальной тенденции не исключает наличие тренда на более продолжительном интервале времени, что требует организации дополнительного контроля.

Правоммерно допустить, что выраженная локальная тенденция или флэт выявлены только в том случае, если из четырех смежных отсчетов имеет место выход из допустимой зоны не более одного значения. Если имеет место выход за пределы зоны двух результатов наблюдений, то вероятность наличия невыявленной (скрытой) локальной тенденции или флэта оценивается крайне низким значением 0,00003. В том случае, если локальная тенденция или флэт вообще отсутствуют, то, по крайней мере, два из четырех или все результаты наблюдений координаты $\alpha_{vz}(t)$ будут находиться вне рассматриваемой зоны тренда, а миграция координаты, скорее всего, обусловлена хаотическими случайными колебаниями.

На следующем шаге рассматриваются отсчеты $\alpha_{vz}(t_i + \Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 1 = t_i + 2\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 2 = t_i + 3\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 3 = t_i + 4\Delta t)$, по их значениям строится зависимость $A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i + 1, t) \pm \pm 3\sigma_{vz}$ для нового шага и делается вывод о проявлении локальной тенденции на отрезке, сдвинутом по времени вперед на один квант Δt относительно предыдущего i -го шага. Аналогичным образом проводятся операции с отсчетами $\alpha_{vz}(t_i + 2\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 1 = t_i + 3\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 2 = t_i + 4\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 3 = t_i + 5\Delta t)$, строится и анализируется зависимость $A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i + 2, t) \pm 3\sigma_{vz}$. Эти действия в определенной степени напоминают технологию формирования скользящей средней [11, 12].

Особенностью выводов, которые формируются на каждом из трех шагов, является то,

что они не могут быть отнесены ни к категории четких, ни к категории вероятностных. По природе явлений эти выводы целесообразно относить к нечетким, и можно говорить только о некоторой степени уверенности в правомочности выводов в зависимости от ситуаций, складывающихся на рассматриваемых интервалах времени. Обязательной операцией является сопоставление выводов, сделанных в результате анализа зависимостей $A_{vz}(t)$ каждой тройки предыдущего, текущего и последующего шагов. Важнейшее значение в этом вопросе имеет последовательность, в которой проявляются или не проявляются локальные тенденции или флэт. В целях обеспечения формального анализа введем группу лингвистических переменных с соответствующими терм-множествами.

Для отражения факта выявления и оценки характера локальной тенденции изменения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или флэта на i -м шаге воспользуемся лингвистической переменной LTS , которую зададим с помощью трех возможных нечетких переменных из ее терм-множества [14, 15]:

- указателя тенденции нарастания значения координаты или проявления "+флэта" LTH ;
- указателя тенденции убывания значения координаты или проявления "-флэта" LTL ;
- указателя отсутствия выраженной тенденции LTN .

Лингвистическая переменная HTS будет отражать на шаге $i + 1$ факт подтверждения наличия и характера тенденции изменения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или флэта, выявленных на i -м шаге. Ее зададим тремя нечеткими переменными из терм-множества лингвистической переменной HTS :

- указателем подтверждения тенденции нарастания значения координаты или проявления "+флэта" HTH ;
- указателем подтверждения тенденции убывания значения координаты HTL или проявления "-флэта";
- указателем отсутствия выраженной тенденции HTN .

Кроме того, введем лингвистическую переменную устойчивости подтвержденной тенденции STS изменения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или флэта на шаге $i + 2$. Она может быть задана с помощью трех нечетких переменных из терм-множества лингвистической переменной STS :

- указателя устойчивости тенденции нарастания значения координаты STH или проявления "+флэта";
- указателя устойчивости тенденции убывания значения координаты STL или проявления "-флэта";
- указателя отсутствия выраженной тенденции STN .

Указатели "+флэт" и "-флэт" фиксируют не только факты наличия флэта, но учитывают и направленность корреляционных связей по времени.

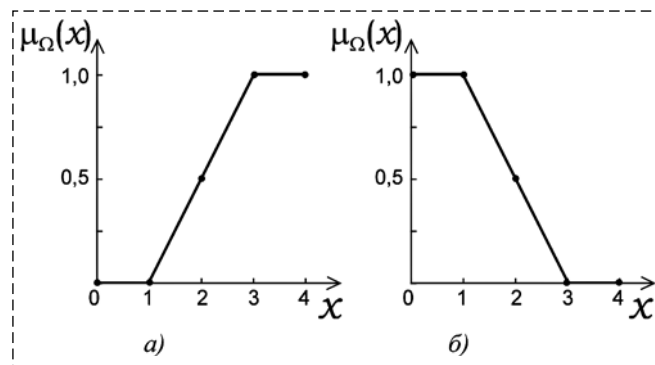
Нечеткие переменные определяются трехместными кортежами:

$$\langle \Omega, X, \mu_{\Omega}(x) \rangle,$$

где Ω — наименование (идентификатор) нечеткой переменной; X — область определения нечеткой переменной (в рассматриваемой ситуации это дискретные значения 0; 1; 2; 3; 4 — число точек, попадающих внутрь зоны тренда $A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i, t) \pm 3\sigma_{vz}$; $\mu_{\Omega}(x)$ — функция принадлежности, заданная на множестве X и определяющая степень уверенности в том, что $\Omega = x$, т. е. x является значением нечеткой переменной [14, 15].

По своей сути каждая из лингвистических переменных LTS , HTS , STS как бы "реализуется" с помощью набора свойственных ей нечетких переменных, число идентификаторов которых в каждом наборе равно трем, что соответствует мощности терм-множеств введенных лингвистических переменных $LTS = \{LTH, LTL, LTN\}$, $HTS = \{HTH, HTL, HTN\}$, $STS = \{STH, STL, STN\}$.

На рис. 1 представлены возможные функции принадлежности рассматриваемых нечетких



Возможные функции принадлежности нечетких переменных:
 $a - K_{ta} > 0, \Omega = LTH, HTH, STH; K_{ta} < 0, \Omega = LTL, HTL, STL$;
 $b - K_{ta} > 0, K_{ta} < 0, \Omega = LTN, HTN, STN$

переменных. Нечеткие переменные с идентификаторами *LTH*, *HTH*, *STH* и *LTL*, *HTL*, *STL* имеют одинаковые функции принадлежности и являются дополнениями функций принадлежности нечетких переменных *LTN*, *HTN*, *STN*.

Определение тенденций миграции значений контролируемых системных параметров

Для формирования выводов о наличии того или иного тренда с учетом последовательности, в которой проявляются или не проявляются локальные тенденции или флэт, а также в целях реализации трехшаговой схемы динамического отслеживания контролируемых координат $\alpha_{vz}(t)$ формально заменим с помощью двоичных триад возможные значения функций принадлежности $\mu_{\Omega}(x)$ нечетких переменных Ω их кодовыми представлениями (кодовыми аналогами) $\mu d_{\Omega}(x)$ (табл. 1). Кодовые аналоги $\mu d_{\Omega}(x)$ нечетких переменных с помощью двоичных триад обеспечивают выполнение кодовой фаззификации этих переменных на основании текущих значений переменной *x*.

Для отображения фактов существования и характеров краткосрочных трендов введем результирующую лингвистическую переменную *TREND* с функцией принадлежности $\mu d_{TREND}(x)$. Формальный прием использования кодовых представлений функций принадлежности $\mu d_{\Omega}(x)$ нечетких переменных позволяет системным аналитикам сформировать 108 различных вариантов продукционных правил относительно значений результирующей лингвистической переменной *TREND*. Однако далеко не все из них могут иметь реальный технический смысл и могут применяться в практических целях.

Таблица 1

Кодовые представления нечетких переменных

Кодовые аналоги	$K_{I\alpha} > 0$			$K_{I\alpha} < 0$		
	$x = 0$ или 1	$x = 2$	$x = 3$ или 4	$x = 0$ или 1	$x = 2$	$x = 3$ или 4
$\mu d_{LTH}(x) = \mu d_{HTH}(x) = \mu d_{STH}(x) =$	100	110	111	100	100	100
$\mu d_{LTN}(x) = \mu d_{HTN}(x) = \mu d_{STN}(x) =$	111	110	100	011	010	000
$\mu d_{LTL}(x) = \mu d_{HTL}(x) = \mu d_{STL}(x) =$	000	000	000	000	010	011

Два продукционных правила носят аксиоматический характер и задают условия гарантированного отсутствия выраженных тенденций:

IF $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 100100100$
THEN
TREND = $\langle$ Гарантированное отсутствие нарастающего тренда или "+флэта" $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = 1 - \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
IF $\mu d_{LTL}(x) \blacksquare \mu d_{HTL}(x) \blacksquare \mu d_{STL}(x) = 000000000$
THEN
TREND = $\langle$ Гарантированное отсутствие убывающего тренда или "-флэта" $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = 1 - \min\{\mu_{LTL}(x), \mu_{HTL}(x), \mu_{STL}(x)\} = 1$.

Для агрегирования подусловий используется операция конкатенации $\blacksquare$ — операция "склеивания" кодов триад:

$$b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \blacksquare b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \blacksquare b_{31} \ b_{32} \ b_{33} = b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \ b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \ b_{31} \ b_{32} \ b_{33}.$$

Возможные решения о проявлении устойчивого тренда нарастания значения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или "+флэта" на шагах *i*, *i* + 1, *i* + 2 могут быть получены с помощью следующих продукций относительно лингвистической переменной *TREND* с функцией принадлежности $\mu_{TREND}(dx)$:

A→IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 111111111$
THEN TREND = $\langle$ Устойчивый нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
B→IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTN}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 100111111$
THEN TREND = $\langle$ Нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTN}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
B→IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTN}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 111100111$
THEN TREND = $\langle$ Нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTN}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
Г→IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STN}(x) = 111111100$
THEN TREND = $\langle$ Неустойчивый нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STN}(x)\} = 1$;
Д→IF $|K_{I\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 111111111$
THEN TREND = $\langle$ Устойчивый "+флэт" $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;

Е → IF $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu_{d_{LTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{HTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{STH}}(x) = 100111111$
 THEN TREND = <"+флэт">;
 $\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;

Ж → IF $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu_{d_{LTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{HTN}}(x) \blacksquare \mu_{d_{STH}}(x) = 111100111$
 THEN TREND = <"+флэт">;
 $\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTN}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;

З → IF $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu_{d_{LTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{HTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{STN}}(x) = 111111100$
 THEN TREND = <Неустойчивый "+флэт">;
 $\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STN}(x)\} = 1$.

Эти же продукции при внесении изменений в условия их реализации путем соответствующей замены нечетких переменных *LTH*, *HTH*, *STH* на переменные *LTL*, *HTL*, *STL* и при замене ожидаемых результатов логических операций на соответствующие значения 011011011, 000011011, 011000011, 011011000 позволяют получить следующие решения относительно переменной TREND с единичными значениями функций принадлежности $\mu_{\text{TREND}}(x)$:

А → <Устойчивый убывающий тренд>;
Б, В → <Убывающий тренд>;
Г → <Неустойчивый убывающий тренд>;
Д → <Устойчивый "–флэт">;
Е, Ж → <"–флэт">; **З** → <Неустойчивый "–флэт">.

Если тренд нарастания или "+флэт" не выявлены, то должно быть проверено наличие убывающего тренда или "–флэта". Их отсутствие позволяет сделать предварительный вывод о хаотической миграции значения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ в границах установленного допуска.

На практике, если такие потребности возникают, могут быть синтезированы и другие виды продукционных правил, однако значения функций принадлежности $\mu_{\text{TREND}}(x)$ не будут превосходить 0,5, и выводы следует относить к категории предварительных. Эту сравнительно невысокую степень уверенности необходимо учитывать при системном использовании результатов, которые, по сути, оказываются ненадежными, но, тем не менее, дают представления о возможных тенденциях развития процессов в системах.

Окончательные выводы можно сделать после дополнительной проверки выполнения неравенств следующего вида:

$$K_{\alpha} > 0; M_{\alpha}(\text{шаг } 1) < M_{\alpha}(\text{шаг } 2) < M_{\alpha}(\text{шаг } 3);$$

$$K_{\alpha} < 0; M_{\alpha}(\text{шаг } 1) > M_{\alpha}(\text{шаг } 2) > M_{\alpha}(\text{шаг } 3).$$

При выполнении первого неравенства может быть принято решение о наличии нарастающего тренда или "+флэта", а во втором случае — о наличии убывающего тренда или "–флэта".

Реальный интерес представляют решения, получаемые по результатам реализации продукций А, Б, В. Эти решения позволяют прогнозировать ожидаемое число циклов функционирования системы и проведения наблюдений, за время выполнения которых при сохранении выявленной тенденции и скорости миграции K_{α}/D_i значение контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ выйдет на границу установленного допуска:

$$\text{при } K_{\alpha} > 0 \quad N_{\Pi} = \text{mod}\{D_i[\alpha_{vz \text{ в }} - \alpha_{vz}(t_i + 5\Delta t)]/[K_{\alpha}\Delta t]\};$$

$$\text{при } K_{\alpha} < 0 \quad N_{\Pi} = \text{mod}\{D_i[\alpha_{vz \text{ н }} - \alpha_{vz}(t_i + 5\Delta t)]/[K_{\alpha}\Delta t]\}.$$

В качестве примера рассмотрим ряд в виде последовательности наблюдений в дискретные моменты времени значений некоторой контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ при $\sigma_{\alpha} = 1,3$; $K_{\text{флэт}} = 1$ (табл. 2).

Для трех последовательных шагов анализа все уравнения зон трендов имеют вид убывающих линейных функций:

$$A_{vz(\text{шаг } 1)} = -11,4t + 38,6 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 2)} = -7t + 29,0 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 3)} = -3,9t + 19,4 \pm 3\sigma_{\alpha}.$$

На первом шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 1)}$ попадают четыре значения: 42, 24, 12, 8; на втором шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 2)}$ входят следующие четыре значения: 24, 12, 8, 2; на третьем шаге в зоне $A_{vz(\text{шаг } 3)}$

Таблица 2

Последовательность наблюдений контролируемой координаты

Отсчет	0	1	2	3	4	5
$\alpha_{vz}(t)$	42	24	12	8	2	1
$\alpha_{vz}^*(t)$	42	24	12	19	2	1

окажутся значения 12, 8, 2 и 1. Таким образом, после кодовой фаззификации может быть синтезировано продукционное правило с единственным значением обычной функции принадлежности для результирующей переменной TREND, которое выявляет устойчивый убывающий тренд:

$$IF |K_{\alpha}| > K_{\text{флэт}} \ \& \ \mu_{LTH}(x) \blacksquare \mu_{HTH}(x) \blacksquare \mu_{STH}(x) = 011011011$$

THEN TREND = ⟨Устойчивый убывающий тренд⟩;

$$\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1.$$

При тех же условиях изменим одно значение в последовательности наблюдений ($\alpha_{vz}^*(t)$; см. табл. 2). В этом случае для трех последовательных шагов уравнения зон трендов принимают следующий вид:

$$A_{vz(\text{шаг } 1)} = -8,1t + 36,4 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 2)} = -5,9t + 29,0 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 3)} = -5t + 26,0 \pm 3\sigma_{\alpha}.$$

На первом шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 1)}$ попадает только одно значение 24; на втором шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 2)}$ попадают два значения: 24 и 2; на третьем шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 3)}$ входят также два значения: 12 и 1. Таким образом, после кодовой фаззификации переменных может быть синтезирована продукция со значением обычной функции принадлежности 0,5. Эта продукция в явном виде не выявляет тренд:

$$IF |K_{\alpha}| > K_{\text{флэт}} \ \& \ \mu_{LTN}(x) \blacksquare \mu_{HTL}(x) \blacksquare \mu_{STL}(x) = 000010010$$

THEN TREND = ⟨Тренд не выявлен⟩;

$$\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTN}(x), \mu_{HTL}(x), \mu_{STL}(x)\} = 0,5.$$

Дополнительная проверка дает следующий результат, который позволяет принять решение о наличии убывающего тренда:

$$K_{\alpha} < 0; M_{\alpha(\text{шаг } 1)} = 24,25 > M_{\alpha(\text{шаг } 2)} = 14,25 > M_{\alpha(\text{шаг } 3)} = 8,5.$$

Заключение

Использование в составе интеллектуальных мехатронных систем средств вычислительной техники и переход на цифровые методы об-

работки информации создают техническую основу для оперативного формирования временных рядов факторных и результативных системных параметров. Применение приемов предварительной обработки временных рядов ограниченной протяженности и предсказание направленности ожидаемого развития системных процессов позволяют оперативно выявлять в системе зарождение опасных тенденций в миграции значений контролируемых параметров к границам допусковых диапазонов. Для наделения системы указанными свойствами в целях принятия текущих решений о выявлении негативной направленности трендов предложено циклическое использование процесса непрерывного динамического отслеживания временных рядов отдельных контролируемых параметров и применение аппарата нечеткой логики с кодовой фаззификацией.

Выработка решений об устойчивости нарастания или убывания отдельных параметрических трендов или о наличии трендовых флэтов может осуществляться с помощью конечного набора продукционных правил, которые образуют последовательную структуру логических выводов. В логическом отношении наиболее просто процедуры отслеживания миграций параметров и продукционные правила выработки решений реализуются на процессорах, которые поддерживают операции с плавающей точкой и логические поразрядные операции. При использовании процессоров, не поддерживающих указанные операции, необходимо дополнительное применение методов арифметического масштабирования и программируемой логики.

Список литературы

1. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 1991.
2. Фомин В. Н. Рекуррентное оценивание и адаптивные фильтры. М.: Наука, 1984.
3. Willski A. S. A survey of design methods for dynamical systems // Automatic Journal of IFAC. 1976. Vol. 12, N. 6. P. 601–611.
4. Sastri T., Flores B., Valdes J. Detection points of change in time series // Computers and Operations Research. 1989. Vol. 16, N. 3. P. 271–273.
5. Szeliski R. Computer Vision Algorithms and Applications. Washington: Springer, 2011.
6. Постон Р., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир, 1980.
7. Арнольд В. И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990.
8. Том Р. Структурная устойчивость и морфогенез. М.: Логос, 2002.
9. Gilmore R. Catastrophe Theory for Scientists and Engineers. N. Y.: Dover, 1993.

10. **Карибский В. В., Пахоменко П. П., Согомонян Е. С., Халчев В. Ф.** Основы технической диагностики. М.: Энергия, 1976.

11. **Питерс Т., Барлетта М.** Основы. Тренды. СПб.: Издательство Стокгольмской школы экономики в С.-Петербурге, 2006.

12. **Мэрфи Д.** Технический анализ фьючерсных рынков. М.: Альпина Паблишер, 2011.

13. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

14. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.

15. **Штовба С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия, 2007.

Digital Control of Tendencies of Sensor Parameters Changing in Intelligent Systems

A. V. Gulay, is@bntu.by, **V. M. Zaitsev**, is@bntu.by
Belorussian National Technical University

Corresponding author: **Gulay Anatoly V.**, Ph.D., Associate Professor, Chief of Department,
Belorussian National Technical University, Minsk, 220065, Republic of Belarus

Accepted on February 02, 2018

Current states of mechatronic systems and the state of control objects in every cycle of functioning are usually evaluated with the aid of a set of values of controlled parameters, which are formed with measuring tracts of the system on the basis of signals of sensors. Presently, methods of the analysis of trends of changing the system parameters and control of their location within the limits of warning and emergency intervals are widely used in mechatronics. However, this provides identification of facts of development of already formed negative tendencies, when urgent managerial decisions and technical measures are required for avoidance of emergency situations. More effective control may be implemented during early assessment of the events, what is very important for mechatronic systems, in which systematic processes relatively quickly take place. In connection therewith the cyclic use has been considered of the three-stage process of continuous dynamic tracing of temporary rows of controlled parameters and the use of a fuzzy logic apparatus with the coded fuzzyfication for taking operative decisions about discovery of negative trends in each of five consecutive intervals of observation. Development of solutions in the mechatronic system about the steady increment or decrease of individual parametrical trends or availability of trend flats can be carried out with the aid of a finite set of production rules, which form a consecutive structure of logical conclusions. As for the logic of the simplest procedures of tracing the migration of parameters and production rules of generation of solutions are implemented in processors which support operations with a floating point and logical digit-to-digit operations.

Keywords: intelligent system; sensor control; digital control; migration of parameters; short-term trend.

For citation:

Gulay A. V., Zaitsev V. M. Digital Control of Tendencies of Sensor Parameters Changing in Intelligent Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 442–450.

DOI: 10.17587/mau.19.442-450

References

1. **Tixonov V. I., Xarison V. N.** *Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskix ustrojstv* (Statistic analysis and synthesis of radiotechnic devices), Moscow, Radio i svjaz', 1991 (in Russian).

2. **Fomin V. N.** *Rekurrentnoe ocenivanie i adaptivnye fil'try* (Recurrent estimation and adaptive filters), Moscow, Nauka, 1984 (in Russian).

3. **Willski A. S.** A survey of design methods for dynamical systems, *Automatic Journal of IFAC*, 1976, v. 12, no. 6, pp. 601–611.

4. **Sastri T., Flores B., Valdes J.** Detection points of change in time series, *Computers and Operations Research*, 1989, vol. 16, no. 3, pp. 271–273.

5. **Szeliski R.** *Computer Vision Algorithms and Applications*, Washington, Springer, 2011.

6. **Poston T., Stewart I.** *Catastrophe theory and its applications*, London, Pitman, 1978.

7. **Arnol'd V. I.** *Teorija katastrof* (The Catastrophe Theory), Moscow, Nauka, 1990 (in Russian).

8. **Thom R.** *Stabilite structurelle et morphogenese*, Paris, InterEditions, 1977.

9. **Gilmore R.** *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers*, N. Y., Dover, 1993.

10. **Karibskij V. V., Paxomenko P. P., Sogomonjan E. S., Xalchev V. F.** *Osnovy texnicheskoj diagnostiki* (Fundamentals of technical diagnostics), Moscow, E'nergija, 1976 (in Russian).

11. **Peters T., Barletta M.** *Tom Peters Essentials Trends*, London, Dorling Kindersley, 2005.

12. **Murphy J.** *Technical Analysis of the Financial Markets*, N. J., Prentice Hall Press, 1999.

13. **Ventcel' E. S.** *Teorija veroyatnostej* (Theory of Probabilities), Moscow, Nauka, 1969 (in Russian).

14. **Zadeh L. A.** The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, N. Y., Elsevier, 1973.

15. **Shtovba S. D.** *Proektirovanie nechetkix sistem sredstvami MATLAB* (Designing of fuzzy systems by means of MATLAB facilities), Moscow, Gorjachaja linija, 2007 (in Russian).