

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АСУТП С ПОМОЩЬЮ СИНХРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

А.А. Сидоров, В.Е. Захарченко

Рассмотрена проблема определения достоверности параметров в системах АСУТП на основе модели объекта, функционирующей синхронно с системой управления. Предложено решение, основанное на синтезе имитационного моделирования и интервальных вычислений и применении аппарата нечетких множеств.

Ключевые слова: достоверность, синхронная модель, неисправность, параметры АСУТП, имитационная модель, нечеткая величина.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно ГОСТ [1] ко всем системам АСУТП предъявляется требование достоверности информации, поступающей в систему в реальном масштабе времени. Достоверность — это комплексное понятие [2], которое связывается с отсутствием неисправности (ошибок) источника данных, канала связи, модулей системы и т. д. Неисправность может быть как явной (выход за диапазон измерения, обрыв канала связи и др.), так и неявной, когда входные данные принадлежат области значений некоторого параметра системы, но не соответствуют действительности.

На стадии изготовления, пуска и наладки АСУТП каждый канал системы проходит метрологическую аттестацию, поверку, калибровку. В результате проведения этих процедур определяется начальный уровень достоверности каналов — для дискретных каналов он, как правило, имеет два значения $\{0, 1\}$, а для аналоговых достоверность является функцией, зависящей от погрешности. Однако в процессе эксплуатации проведение процедур проверки достоверности не всегда возможно в силу ряда причин (многие каналы принципиально нельзя откалибровать, поверить или заменить без остановки технологического процесса). Кроме того, работая в промышленном окружении, каналы и источники информации подвергаются различного рода случайным воздействиям внешней среды:

помехи, наводки, вибрации, шумы и т. д. Более того, со временем все характеристики источников и каналов информации ухудшаются [3]. Поэтому по прошествии некоторого времени с начала эксплуатации системы у экспертов возникает сомнение в правильности значений параметров. Можно ли доверять значению параметра? Как оценить достоверность расчетных параметров? При различных показаниях дублированных источников информации, какому из источников доверять? В реальных условиях ответы на эти вопросы неоднозначны. Зачастую данные проблемы может решить эксперт (обслуживающий персонал) на основе своего опыта и истории функционирования системы. Эксперт определяет основные причины, по которым значение не может быть отображено с необходимой точностью и, исследуя их, делает вывод: достоверен параметр или нет. Определить достоверность всех параметров (их число в крупных системах достигает нескольких тысяч и более) системы в реальном времени эксперт (или даже несколько экспертов) не может.

Вывод: оперативному персоналу и системам управления необходимо автоматически в реальном времени предоставлять кроме значений параметров *дополнительную информацию об их достоверности*.

Существуют немало методов для определения достоверности значений параметров системы, в основном они выдают признак: достоверен параметр по этому методу или нет. Более того, современные программно-аппаратные средства в ряде

случаев обеспечивают дополнительную информацию о достоверности (качестве) этого параметра, которую при принятии управляющих решений нельзя не учитывать. Яркими примерами таких программно-аппаратных средств служат интеллектуальные датчики с самовалидацией [3, 4], а также параметры, передаваемые в стандарте OPC (OLE for Process Control) [5]. Таким образом, со значением параметра образуется множество признаков достоверности, каждый из которых ответственен в узкой области, и на их основе сложно определить адекватность значения параметра сложившейся технологической ситуации в целом, т. е. достоверности. Особенно усложняется определение достоверности расчетных параметров.

Определение достоверности предполагает избыточность. Различают структурную, информаци-

онную и временную избыточность. Структурная избыточность предполагает резервирование, дублирование элементов системы, вследствие чего она удорожается. Информационная избыточность подразумевает наличие дополнительных связей (логических, математических, физических) в АСУТП, на основании которых можно определить достоверность исходных данных. Временная избыточность связана с необходимостью временных затрат на выполнение процедур по определению достоверности параметров [2]. Отметим, что и структурная избыточность, и информационная так или иначе нуждаются в ресурсе времени. С другой стороны, временные ограничения наиболее важные в области промышленной автоматизации, более того, они определяют специфику данной области. О достоверности можно судить, опираясь на обяза-

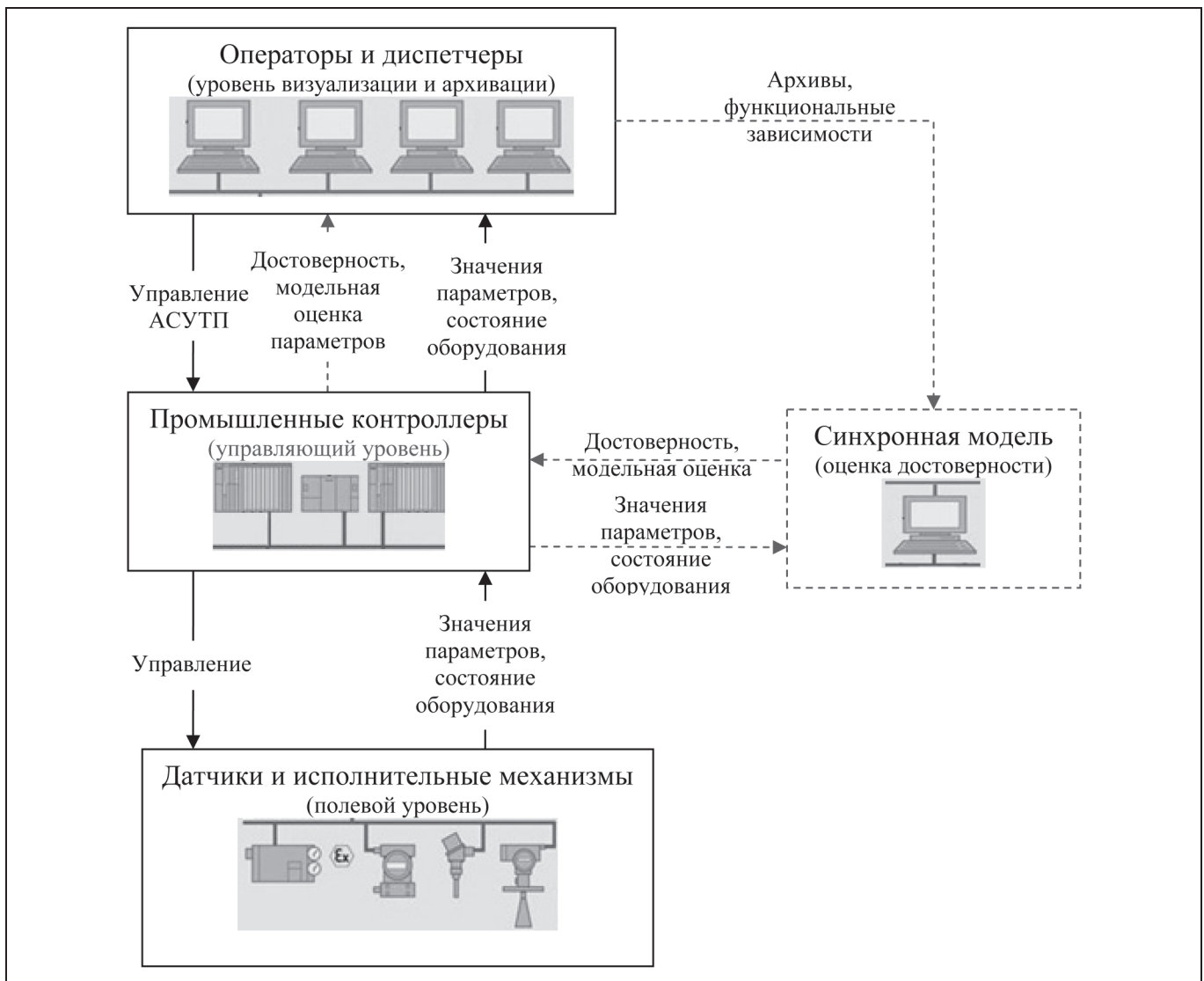


Рис. 1. Структурная схема АСУТП с синхронной моделью



тельные (в смысле непосредственного управления) знания об объекте управления, об АСУТП, о физических, математических, логических и других законах.

В представленной работе предлагается новый способ определения достоверности, который основан на применении моделей, базирующихся на опыте эксперта и исторических данных о функционировании объекта управления и называемых автором синхронными. Такой подход позволяет рассматривать параметр системно и формировать признак достоверности как оценку виртуального эксперта.

В настоящее время получила распространение структурная схема АСУТП (рис. 1), предполагающая несколько уровней: полевой, включающий в себя датчики и исполнительные механизмы, управляющий, основанный, главным образом, на программируемых логических контроллерах (ПЛК), и уровень визуализации и архивации (SCADA-систем). На управляющий уровень возложены следующие функции: собственно управление процессом (управляющие алгоритмы, функции, контроль времени, регулирование), контроль достоверности задания оператора (от SCADA-системы), контроль достоверности поступающих от объекта параметров и др. Опираясь на собственный опыт, можно отметить, что в современных системах управления решение задач определения достоверности занимает от 20 до 70 % ресурсов (объема данных, процессорного времени и т. д.). Задачи по определению достоверности параметров целесообразно переложить на отдельную модель, которая содержит необходимую базу знаний об объекте. На типовой схеме АСУТП (см. рис. 1) штриховыми линиями показаны новые элементы и потоки данных, связанные с выделением синхронной модели.

Модель для оценки достоверности параметров АСУТП должна:

- 1) работать в непрерывном режиме;
- 2) осуществлять сбор информации о текущих значениях основных параметров системы управления, оказывая минимальное влияние на быстродействие системы управления;
- 3) функционировать в едином времени с системой управления, т. е. проверять полученные данные по критериям достоверности и осуществлять обмен данными с ней в рамках периода ее (не медленнее) обработки данных, т. е. синхронно;
- 4) осуществлять поддержку управленческих решений: выдавать системе управления признаки достоверности параметров в зависимости от ситуации, а также при неисправности, недостоверности параметра должна передавать системе управления приближенные (имитированные, модельные) значения;

5) быть масштабируемой (с возможностью добавления новых параметров);

6) быть интегрируемой, т. е. в разрабатываемой системе должны быть предусмотрены открытые интерфейсы для взаимодействия со сторонними системами;

7) обладать простым и наглядным интерфейсом, который позволял бы оператору (эксперту) при необходимости изменить (добавить, удалить, изменить) правила формирования признаков достоверности без участия разработчика.

Из перечисленных ключевым является п. 3, поэтому модель, удовлетворяющую перечисленным требованиям, далее будем именовать *синхронной*.

1. ПОСТРОЕНИЕ СИНХРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Как было отмечено, для определения достоверности синхронная модель призвана использовать опыт экспертов, учитывать историю функционирования АСУТП, проверять функциональные зависимости параметров. Под функциональными зависимостями понимается возможность вычисления значения одного параметра системы через другие. Таким образом, синхронная модель исключает основные источники недостоверности параметров большинства современных АСУТП.

Самое сложное при проверке достоверности — формализовать историю функционирования системы и описать функциональные зависимости. Для построения синхронной модели необходимо осуществить следующие операции:

- провести декомпозицию функционирования объекта управления на режимы;
- оценить точность по каждому параметру (метрологические данные);
- получить архивные данные поведения системы управления;
- сформировать список функциональных зависимостей по основным параметрам.

Рассмотрим эти операции более детально.

1.1. Моделирование поведения объекта на основе исторических данных

Оценка достоверности на основе исторических данных предполагает сравнение значения параметра в настоящий момент времени с аналогичными значениями в прошлом.

Эксперт разделяет весь процесс на участки, на которых параметр изменяется по некоторому стабильному легко формализуемому закону. Логично связать эти участки с технологическими режимами объекта управления. В каждом режиме предполагается поведение параметра, качественно отличное от поведения в других состояниях объекта уп-

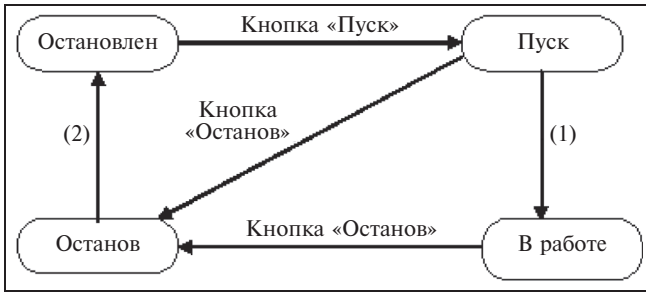


Рис. 2. Элементарная схема состояний

равления. Формально описание режимов можно выполнить в виде карты состояний (statechart, stateflow) согласно стандарту UML [6] или на основе гибридной схемы Пнуэли [7, 8]. Переход из одного режима в другой осуществляется событийно, т. е. мгновенно по выполнению некоторого условия.

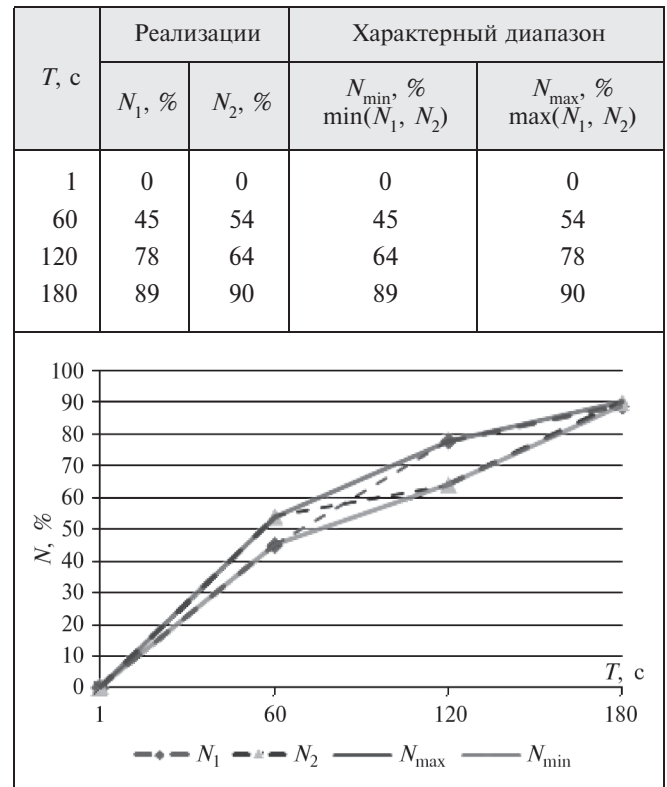
Пример 1. Выделим четыре режима нормально-го функционирования объекта: остановлен, пуск, в работе, останов (рис. 2). Изначально объект остановлен, далее по нажатию кнопки «Пуск» происходит переход в режим пуска. По выполнению некоторого условия (1) происходит переход в рабочий режим. Для останова объекта требуется нажать на кнопку «Останов». Режим «Останов» завершается по некоторому условию (2). После чего осуществляется переход в остановленное состояние. Каждое из событий, по которому осуществляется смена режима, дискретное и выполняется мгновенно. ♦

Учитывая, что число предшествующих реализаций постоянно увеличивается, удобно выделить диапазон *характерных* значений параметра в каждом из режимов, и сравнивать текущее значение параметра с границами диапазона. Иными словами, пусть имеется N реализаций некоторой технологической ситуации (режима), тогда значение параметра y в каждый момент времени можно с некоторой уверенностью заключить в интервал, определенный предыдущими реализациями y_1, \dots, y_N . В общем случае, с различной длительностью режима T_1, \dots, T_N соответственно. Если отмерять время от начала режима $t_x \in [0, \max(T_1, \dots, T_N)]$, то значение параметра y в этот момент времени t_x предположительно будет лежать в интервале между наименьшим значением параметра из всех реализаций на данный момент времени t_x и наибольшим значением параметра по всем реализациям в тот же момент времени $y(t_x) \in [\min(y_1(t_x), \dots, y_N(t_x)), \max(y_1(t_x), \dots, y_N(t_x))]$. Объединяя наименьшие значения параметра во всех реализациях режима од-

ной функцией, а наибольшие — другой, получается такая пара функций, которая в каждый момент времени образует интервал, содержащий значения всех предшествующих реализаций параметра. Интервальная область, образованная этими функциями, в каждый момент времени определяет интервал, который будем называть *характерным диапазоном* изменения параметра. В каждом из режимов на основе данных архива системы управления (SCADA-системы) можно сформировать характерный диапазон изменения параметра.

Пример 2. Рассмотрим поведение параметра «Частота вращения гидроагрегата, N » в режиме «Пуск» на примере двух реализаций, взятых из архива АСУТП (см. таблицу). На графике функции N_{\min} и N_{\max} представлены в кусочно-линейном виде. В синхронной модели каждый из полученных отрезков описывается в рамках технологического режима «Пуск» путем выделения нескольких подрежимов. В данном примере число подрежимов — три, в рамках каждого подрежима характерный диапазон описывается двумя прямыми линиями (линией минимума и линией максимума).

Характерный диапазон, сформированный описанным способом, зависит от числа реализаций N : чем меньше реализаций, тем ниже уверенность в том, что $(N + 1)$ -я реализация будет принадлежать

 Определение характерного диапазона параметра «Частота вращения N гидроагрегата»




сформированной интервальной области. Очевидно, недостаток ретроспективных данных необходимо восполнить, одним из источников информации может стать эксперт технологического процесса. Эксперт на основе своего опыта и знаний определит величину, на которую следует увеличить характерный диапазон в каждом режиме. Для уменьшения числа режимов и подрежимов, а также для внесения поправок эксперта может возникнуть необходимость описания границ характерного диапазона более сложными способами, например, аппроксимацией нелинейными функциями [9, 10], с помощью нейронных сетей [11] и др.

1.2. Моделирование функциональных зависимостей

Определение достоверности параметров на основе функциональных зависимостей базируется на идее возможного вычисления значения одного параметра системы через другие с использованием формализованных закономерностей, описанных в виде функций из предметной области рассматриваемого технологического процесса. В случае отсутствия строгих равенств или сложности их определения, на производстве часто используют эмпирические зависимости. Таким образом, один параметр системы может быть определен расчетным путем через другие.

Использование функциональных зависимостей для параметров, выраженных четкими величинами, на практике затруднено, поскольку четкое представление не учитывает неточности измерений, ошибки передачи информации и оценки эксперта. Кроме того, невозможно ожидать точного совпадения рассчитанного и измеренного значений параметра. Поэтому целесообразно применять методы описания неопределенности. В настоящей работе для описания неопределенности используются интервалы [12, 13]. В реальных системах истинное значение параметра неизвестно, известна лишь его оценка с некоторой точностью, которую определяют средства измерения, каналы передачи данных, внешние воздействия, ошибки округления и вычисления и пр. Значение параметра в момент времени t можно представить интервалом

$$P_t = [p_t - a, p_t + b], \quad (1)$$

где p_t — значение параметра в настоящий момент времени, поступившее в систему управления, $a, b > 0$ — величины, характеризующие неопределенность параметра в рассматриваемый момент времени таким образом, что истинное значение параметра технологического процесса p^* непременно принадлежит интервалу $[p - a, p + b]$. Существует

немало методов оценивания величин a, b [14–19]. В общем случае величины a и b могут изменяться во времени вместе с технологическим процессом. Описание функций $a(t)$ и $b(t)$ может быть выполнено аналогично формированию диапазона характерного поведения параметра АСУТП.

Если представить значения параметров системы в момент времени t в интервальном виде (1), то можно определить расчетное значение параметра как интервал вида $P_{\text{расч}} = f(P_1, \dots, P_n) = [p_{\text{pmin}}, p_{\text{pmax}}]$, где P_1, \dots, P_n — значения параметров системы управления в момент времени t , p_{pmin} и p_{pmax} — границы расчетного интервала параметра $P_{\text{расч}}$.

В общем случае для некоторых параметров P системы можно сформировать не одно, а систему интервальных равенств вида $P_{\text{расч}} = f_k(P_1, \dots, P_{nk})$, $P_{\text{расч}}$ — интервальное вычисленное значение параметра P , f_k — интервальная функция, заданная для параметра P , $1 \leq k \leq K$, K — общее число функциональных зависимостей для параметров P , P_1, \dots, P_{nk} — интервальные значения параметров в рассматриваемый момент времени, nk — число параметров, от которых зависит параметр P в k -й функциональной зависимости.

Функции вида $P_{\text{расч}} = f_k(P_1, \dots, P_{nk})$ могут быть вычислены с помощью аппарата достоверных вычислений [20], интервального анализа [12, 21, 22] или недоопределенных моделей А.С. Нариньяни [13].

Предложенный подход позволяет сформировать модель объекта управления с дискретными режимами (состояниями). В каждом режиме параметры объекта управления описываются непрерывными функциями (характерным диапазоном поведения и функциональными зависимостями). Такую модель можно описать как гибридную имитационную модель [23, 24]. Она способна в реальном времени формировать для каждого параметра несколько интервальных оценок: характерный диапазон и расчетные значения по каждой функциональной зависимости во всех режимах функционирования объекта управления, на основе которых осуществляется оценка достоверности значений параметров.

2. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Оценка достоверности формируется в результате сравнения значения p_t параметра в настоящий момент времени с границами каждой интервальной оценки этого параметра $P_{\text{хар}} = [p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$.

Поскольку значение параметра известно с некоторой точностью, то его следует представить в интервальном виде P_t (1). Тогда достоверность параметра P_t можно оценить мерой вхождения интервала P_t в интервал $P_{\text{хар}}$, определенной на интервале $[0, 1]$:

$$D(p_t) = \begin{cases} 0, p_t - a > p_{\max} \text{ или } p_t + b < p_{\min}, \\ 1, p_t - a > p_{\min} \text{ и } p_t + b < p_{\max}, \\ \frac{p_t + b - p_{\min}}{a + b}, p_t - a \leq p_{\min}, \\ \frac{p_{\max} - (p_t - a)}{a + b}, p_t + b \geq p_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Можно заметить, что значение параметра, заданное таким образом, представляет собой нечеткую величину, полностью определенную четверкой четких чисел $\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4) = (p_{\min} - (a + b), p_{\min}, p_{\max}, p_{\max} + (a + b))$, при этом функция $D(p_t)$ является функцией принадлежности.

Пример 3. Пусть температура подпятника гидроагрегата в рабочем режиме $T_{\text{п}}$ составляет 50...60 °C и измеряется с погрешностью $a = b = 1$ °C, тогда значению температуры $T_{\text{п}} = 50,1$ °C будет соответствовать достоверность $D(T_{\text{п}} = 50,1 \text{ °C}) = 0,55$. Аналогично, $D(T_{\text{п}} = 52,0 \text{ °C}) = 1$, $D(T_{\text{п}} = 60,8 \text{ °C}) = 0,1$. ♦

Пример 4. Пусть по разным каналам в систему поступают три параметра расхода: Q с погрешностью 0,01 % и Q_1 и Q_2 с погрешностью 0,02 %, связанные функциональной зависимостью $Q_1 = Q - Q_2$, и в некоторый момент времени $Q_1 = 23 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q = 41 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_2 = 18,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Далее, $Q_1 = [22,54; 23,46]$; $Q = [40,59; 41,41]$; $Q_2 = [18,13; 18,87]$, расчетное значение $Q_{\text{пр}} = [21,78; 23,28]$, таким образом, достоверность параметра Q_1 $D(Q_1) = 0,8043$. Если $Q_2 = 18,1$, то $D(Q_1) = 1$, если $Q_2 = 17$, то $D(Q_1) = 0,228$. ♦

Поскольку в общем случае для некоторых параметров P системы можно сформировать не одну, а несколько интервальных оценок P_1, \dots, P_K , то для каждого P_k можно определить нечеткую величину \bar{p}_k с достоверностью, определяемой выражением (2), $1 \leq k \leq K$, где K — общее число интервальных оценок параметра P . Объединенную оценку достоверности можно получить на основе нечеткой арифметики несколькими способами: объединением нечетких величин, анализом минимумов и максимумов функций принадлежности и др. [11, 25—28]. Выбор способа расчета должен

опираться на требования, предъявляемые к синхронным моделям, в число которых входит требование максимально быстрого расчета оценки достоверности. Кроме того, способ должен отвечать особенностям технологического процесса, а также основываться на знаниях эксперта. В этой связи для расчета объединенной оценки достоверности предлагается простой в вычислительном плане способ, а именно — расчет линейной комбинации нечетких величин:

$$\bar{p} = \sum_{k=1}^K \gamma_k \bar{p}_k,$$

где \bar{p}_k — нечеткая величина, характеризующая достоверность параметра P по k -й интервальной оценке, $\gamma_k \in [0, 1]$ — весовые коэффициенты ($\sum \gamma_k = 1$), задаваемые экспертом исходя из анализа приоритетов интервальных оценок. Если все зависимости эквивалентны (имеют равный приоритет), то $\bar{p} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{p}_k$ и для нечетких величин справедлива запись:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= (p_1, p_2, p_3, p_4) = \\ &= \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{1k}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{2k}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{3k}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{4k} \right). \end{aligned}$$

Для интерпретации результата введем две величины: порог доверия d_{trust} и порог сомнения d_{doubt} такие, что $d_{\text{trust}}, d_{\text{doubt}} \in [0, 1]$ и $d_{\text{trust}} < d_{\text{doubt}}$. Если $D(p_t) \geq d_{\text{trust}}$, параметр p_t достоверен в момент времени t , если $D(p_t) < d_{\text{doubt}}$, параметр p_t — не достоверен, в остальных случаях значение параметра p_t сомнительно, т. е. значение параметра не удовлетворяет одному или нескольким критериям.

На основе оценки достоверности, полученной по приведенной методике, возможно формирование модельного значения. В случае отказа источника данных или канала система управления может ориентироваться на модельное значение, вычисляемое как нечеткое среднее общей оценки достоверности. Для нечетких величин [11] вида $\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ нечеткое среднее можно рассчитать по формуле $p_m = \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4$.

Модельное значение параметра может участвовать в алгоритмах управления, как минимум, для безаварийной приостановки технологического процесса.

3. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИНХРОННОЙ МОДЕЛИ

Рабочий цикл состоит из следующих этапов:

- синхронная модель получает текущие значения параметров системы управления;
- в зависимости от полученных значений вычисляются текущие интервальные оценки;
- в соответствии с изложенными алгоритмами формируются достоверность и модельное значение каждого параметра в текущий момент времени;
- синхронная модель передает оценки достоверности и модельные значения параметров в систему управления.

Предлагаемые алгоритмы расчета достоверности не требуют большой производительности вычислительных устройств и могут быть применены

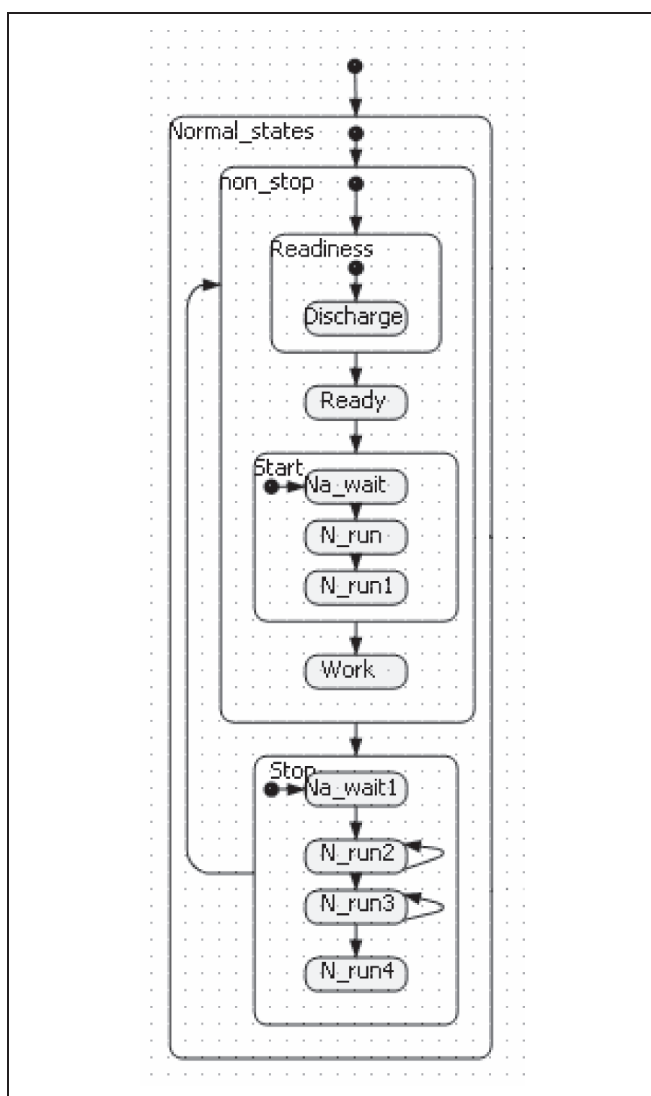


Рис. 3. Схема состояний гидроагрегата

в режиме реального времени совместно с системой управления.

На основе полученной от синхронной модели информации система управления формирует сигналы управления и готовит информацию для визуализации и архивации. На экране оператора полученный результат можно выделить цветом: параметр достоверен или не достоверен. Модельное значение параметра рекомендуется выделить ярким цветом, это позволит оператору визуально определить область неисправности и принять меры по ее устранению.

Опыт реализации синхронной модели. Предлагаемая методика апробирована на АСУТП гидроагрегата Жигулевской ГЭС. Упрощенная схема состояний гидроагрегата представлена на рис. 3. Система контроля достоверности на основе синхронных моделей в реальном времени следит за 24 основными параметрами системы управления, учитывает историю процесса и анализирует 6 функциональных зависимостей. Система построена с использованием среды имитационного моделирования «AnyLogic» (<http://www.xjtek.com/>). Среда исполнения «AnyLogic» использует кроссплатформенный язык программирования Java и позволяет подключать динамические библиотеки. С помощью этого механизма осуществлена интеграция системы управления и синхронной модели, реализованы операции над нечеткими и интервальными величинами, а также функции оценки достоверности параметров. При этом рабочий цикл синхронной модели не превышает цикл обработки входных данных контроллером (150 мс).

После введения автоматической системы контроля достоверности параметров на основе синхронных моделей число ложных срабатываний системы управления сократилось на 60 %.

Для реализации синхронной модели применение специализированного пакета моделирования, в частности «AnyLogic», не обязательно, его функции можно реализовать и на базе ПК, и в среде ПЛК, но пакет «AnyLogic» позволил наглядно представить схему режимов и описать взаимодействие параметров стандартными средствами с минимальными трудозатратами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация синхронной модели в рамках АСУТП позволяет:

- уменьшить число ложных срабатываний АСУТП благодаря принятию решений на основе проверенных, достоверных данных и, как следствие, снизить время простоя оборудования;

- усилить контроль исправности оборудования, что позволит раньше находить неисправности и устранить их;
- при недостоверности значения параметра АСУТП воспользоваться его модельной оценкой;
- при дублировании автоматически определить исправный, достоверный источник информации без помощи оперативного персонала и осуществить управление на основе корректных (достоверных) данных.

Кроме того, реализация синхронной модели предоставляет следующие возможности:

- автоматическое прогнозирование поведения параметра в заданном режиме;
- проверка алгоритмов управления без объекта управления;
- обучение персонала на основе модельных значений.

Итак, предлагаемое решение на основе синхронных моделей обладает низкой вычислительной сложностью, основывается на ретроспективных данных и на опыте экспертов технологического процесса, что позволяет оценивать достоверность параметров в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 34.603—92*. Информационная технология. Виды испытаний автоматизированных систем. — М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. *Кульба В.В., Ковалевский С.С., Шелков А.Б.* Достоверность и сохранность данных в АСУ. — М.: СИНТЕГ, 2003. — 500 с.
3. *Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е.* Контроль достоверности информации, поступающей от датчиков // Датчики и системы. — 2008. — № 8. — С. 58—63.
4. *POLARCOM* Проект SEVA (SEnsor VALidation — самоконтроль датчиков) // Автоматика и робототехника. — 2000. URL: http://www.polarcom.ru/~vvtsv/ref2000/r017_2.htm (дата обращения: 10.09.2009).
5. *Industry Standard Specification OPC Overview / OPC Foundation*. — 1998. — 16 p.
6. *Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J.* The Unified Modeling Language for Object-Oriented Development / Documentation Set Version 1.1. — 1997. — 35 p.
7. *Harel D.* Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems // Science of Computer Programming. — 1987. — Vol. 8, N 3. — P. 231—274.
8. *Парийская Е.Ю.* Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию непрерывно-дискретных систем // Дифференциальные уравнения и процессы управления. Электронный журнал. — 1997. — № 1. — С. 91—120.
9. *Захарченко В.Е.* Имитационная модель гидроагрегата для тестирования алгоритмов АСУТП // Автоматизация в промышленности. — 2007. — № 7. — С. 37—40.
10. *Захарченко В.Е.* Контроль достоверности параметров АСУТП // Автоматизация в промышленности. — 2008. — № 7. — С. 37—40.
11. *Лю Б.* Теория и практика неопределенного программирования. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 416 с.
12. *Шокин И.Ю.* Интервальный анализ. — М.: Наука, 1981. — 112 с.
13. *Нариньяни А.С.* Недоопределенные модели и операции с недоопределенными значениями. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. — 33 с.
14. *Сквайрс Дж.* Практическая физика. — М.: Мир, 1971. — 246 с.
15. *Кудряшова Ж.Ф., Рабинович С.Г., Резник К.А.* Методы обработки результатов наблюдений при измерениях // Тр. метрологич. ин-тов СССР. — М. — Л.: Изд-во стандартов, 1972. — Вып. 134 (194).
16. *Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.* Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 335 с.
17. *Тюрин Н.И.* Введение в метрологию. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 210 с.
18. *Соловьев В.А., Яхонтова В.Е.* Элементарные методы обработки результатов измерений. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. — 72 с.
19. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешности результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
20. *Достоверные* вычисления. Базовые численные методы / Кулиш У. и др. — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. — 496 с.
21. *Moore R.E.* Automatic local coordinate transformation to reduce the growth of error bounds in interval computation of solutions of ordinary differential equations / Error in Digital Computation. — New York: John Wiley and Sons, Inc, 1965. — Vol. 1. — P. 61—130.
22. *Шарый С.П.* Конечномерный интервальный анализ / Интервальный анализ и его приложения. — Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН. URL: <http://www.sbras.ru/interval/Library/InteBooks/Shary/SharyBook.pdf> (дата обращения: 09.2008).
23. *Картов Ю.Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.
24. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. — М.: Наука, 1978. — 340 с.
25. *Заде Л.* Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решения / Математика сегодня: Сб. ст. — М.: Знание, 1974. — С. 5—49.
26. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — С. 165.
27. *Sakawa M., Nishizaki I., Uemura Y.* Interactive fuzzy programming for multi-level linear programming problems with fuzzy parameters // Fuzzy Sets And Systems. — 2000. — Vol. 9. — P. 3—19.
28. *Zimmerman H.J.* Fuzzy Set Theory and its Applications. — Kluwer, etc : World Scientific, 1992. — 435 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Амбарцумяном.

Сидоров Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, директор по развитию, ☎/✉ +7 (846) 933-03-50, ✉ ac@sms-samara.ru,

Захарченко Виталий Евгеньевич — вед. инженер, ☎/✉ +7 (846) 269-15-20, доб. 131, ✉ zevs@sms-samara.ru,

ООО НВФ «Сенсоры. Модули. Системы», г. Самара.