

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Развитие новых технологий требуют все большего количества измерительной информации. В современных измерительных системах достигнута высокая точность и обеспечены значительные возможности по обработке результатов измерения. Однако в подавляющем большинстве случаев нормируется (устанавливается) погрешность измерения выходного сигнала сенсора, а не физической величины. За последние десятилетия точность измерения сигнала сенсора возросла в десятки раз. Однако анализ [1] и [2] показал, что погрешность сенсоров незначительно снизилась за это время. Например, при измерении температуры термометрами сопротивления Pt100 фирмы Honeywell [1], подключенными к блоку Hудра 2625А фирмы Fluke [3], соотношение погрешностей элементов измерительного канала больше пятидесяти. Развитие средств вычислительной техники позволило значительно повысить степень обработки информации (использовать сложные математические методы обработки и оперировать знаниями об объекте измерения). Но большинство работ, посвященных обработке сигналов сенсоров [4, 5, 6, 7], рассматривают вопросы, не связанные с повышением точности измерения физической величины при эксплуатации измерительных систем.

В настоящей работе рассматриваются вопросы построения информационно-измерительных систем, использующих методы искусственного интеллекта [8, 9], в частности, аппарат нейронных сетей, для повышения точности измерения физических величин.

1. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ИСИ) ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Прецизионное измерение физических величин требует значительных затрат как измерительных, так и вычислительных ресурсов, что необходимо учитывать при синтезе обобщенной структуры системы. Наиболее целесообразной структурой для построения ИСИ физических величин является дистрибутивная многоуровневая иерархическая структура, в которой информация сенсоров обрабатывается на промежуточных уровнях и только "полезная" информация передается на высшие иерархические уровни [10]. Обобщенная оценка такой системы должна проводиться по следующим основным свойствам:

- *Точность.* ИСИ должна компенсировать систематическую (смещение, приращение, нелинейность, перекрестные помехи) погрешность, постоянный дрейф и случайные погрешности сенсоров и других компонентов ИСИ. При этом, основными методами обеспечения высокой точности измерения физических величин являются методы калибровки, поверки и прогнозирования, а также их сочетание [11];
- *Надежность.* ИСИ должна обеспечивать цензурирование данных и самотестирование (включая определение поправок канала измерения сигнала сенсора);
- *Универсальность.* ИСИ должна обеспечивать измерение широкой номенклатуры физических величин с помощью

вание модулей аппаратного и библиотек программного обеспечения;

- *Адаптивность.* Совместное выполнение вышеперечисленных свойств для разных сенсоров возможно только за счет адаптивности системы. Параметры обработки в каждой части системы должны автоматически устанавливаться и адаптироваться высшим иерархическим уровнем. ИСИ должна изменять алгоритмы работы (поведение) с целью обеспечения требуемой точности измерения в различных условиях эксплуатации. Параметры процесса адаптации должны оптимизироваться за счет накопления информации о погрешностях компонентов ИСИ и их изменениях (самообучение).

Анализ возможностей обеспечения перечисленных свойств показал, что наиболее целесообразной для ИСИ является трехуровневая структура [12]. Исходными данными для проектирования нижнего уровня служит информация о выходных сигналах сенсоров, для среднего уровня – о характеристиках преобразования сенсоров и для верхнего уровня – о дрейфе сенсоров и других компонентов ИСИ. Анализ такой информации позволил сформулировать основные правила проектирования ИСИ:

1. Аппаратное обеспечение нижнего уровня должно обеспечивать преобразование в код сигналов большинства сенсоров. Анализ разнородных и разнотипных сенсоров показал, что их выходные сигналы в большинстве случаев (например, свыше 95% для электростанции) ограничены следующими видами и значениями: (i) постоянное напряжение или ток (или их отношения) в диапазонах 10мВ – 10В и 1мкА – 20мА; (ii) переменное напряжение или ток (или их отношения) в диапазонах 100мВ – 10В и 100мкА – 20мА; (iii) частота или период (или их отношения) в диапазоне 10Гц – 1МГц и 1мкс – 100мс. Допустимая погрешность измерения изменяется в широких пределах – от 0.05% до 1%. Необходимо учесть, что в ИСИ калибровка или поверка сенсора должна выполняться с максимальным использованием средств самой ИСИ. При сличении сенсора с образцовым сенсором последний должен подключаться к измерительным модулям сети. Таким образом, погрешность измерения сигнала сенсора должна соответствовать погрешности не рабочего сенсора, а образцового [13];
2. На уровне аппаратного обеспечения должна быть исключена всякая обработка сигнала. Это связано с тем, что каждый тип сенсора требует индивидуальных алгоритмов обработки, а их смена на аппаратном уровне представляет большие трудности;
3. Традиционные алгоритмы обработки сигналов сенсоров разных типов включают сходные процедуры: цензурирование, установку нуля и калибровку, функциональные преобразования. Однако функциональные преобразования должны выполняться с применением очень широкого класса различных функций. В то же время, алгоритмы коррекции погрешностей разных сенсоров очень сильно отличаются. Таким образом, программное обеспечение

Кочан Владимир Владимирович. К.т.н., доцент каф. Специализированных компьютерных систем Тернопольской академии народного хозяйства.

разнотипных и разнородных сенсоров и возможность легкого наращивания. Это означает широкое использо-

ИСИ должно базироваться на достаточно универсальных средствах функционального преобразования. В качестве

такого средства целесообразно использовать нейронные сети [14].

Рассмотрим выполнение этих правил на нижнем, среднем и верхнем уровнях, в соответствии со структурой ИСИ, описанной в [12].

2. НИЖНИЙ УРОВЕНЬ ИСИ

Для измерения сигналов сенсоров на нижнем уровне ИСИ достаточно использовать аналого-цифровые преобразователи (АЦП) трех видов:

1. Прецизионный АЦП напряжения низкого уровня [15]. Он обеспечит подключение сенсоров температуры, линейных и угловых размеров, механических сил, напряжений, давления, момента, расхода жидкости и газа, влажности всех типов и сенсоров с нормированным выходным сигналом, имеющих на выходе сигнал постоянного напряжения, тока (измеряется с применением дополнительных шунтов) или сопротивления (измеряется с применением шунтов в качестве образцовых резисторов). Этот АЦП должен соответствовать следующим требованиям: пределы измерения напряжения - от 10...15 мВ до 1...1.5В; максимальная чувствительность - 0.5...1 мкВ; погрешность измерения - 0.02%; разрядность - 15...16; количество каналов - не менее 8; среднее время измерения по одному каналу - не более 0.1с.
2. Быстродействующий АЦП напряжения среднего уровня высокой точности. Он обеспечит подключение сенсоров линейных и угловых размеров, механических сил, напряжений, давления, момента, расхода жидкости или газа, вибрации всех типов и ультразвуковых сенсоров (имеющих на выходе сигнал переменного напряжения), тока (измеряется с применением дополнительных шунтов) или сопротивления переменному току (измеряется с применением шунтов в качестве образцовых резисторов). Этот АЦП должен соответствовать следующим требованиям: пределы измерения напряжения постоянного тока - от 100 мВ до 10 В; максимальная чувствительность - 3 мкВ; погрешность измерения - 0.05 %; разрядность - 15...16; количество каналов - не менее 8; среднее время измерения по одному каналу - не более 10 мкс.
3. АЦП частотно-временных сигналов. Он обеспечит подключение сенсоров температуры, механических сил, напряжений, давления, момента, расхода жидкости или газа и сенсоров всех типов, использующих явление резонанса, имеющих на выходе сигнал в виде частоты, периода или количества импульсов. Этот АЦП должен соответствовать следующим требованиям: пределы измерения частоты - от 10...15 Hz до 10...15 MHz; пределы измерения периода и длительности импульса - от 100 мкс до 50 мс; максимальная чувствительность - 0.1...0.2 мкс; погрешность измерения - 0.002%; разрядность - не менее 16; количество каналов - не менее 8.

Свойства точности и надежности на нижнем уровне обеспечиваются автоматическим самотестированием АЦП и прогнозированием их погрешностей с помощью нейронной сети [16]. Установка нуля в АЦП первых двух типов требует только закорачивания одного из каналов измерения. Для их калибровки необходим источник напряжения, обеспечивающий на каждом диапазоне АЦП несколько точек калибровки с погрешностью менее 0.01%. АЦП частотно-временных сигналов не требует калибровки, так как его погрешность определяется малой погрешностью нестабильности кварцевого резонатора. Его самотестирование организуется путем замыкания входов программно-управляемых счетчиков на выход одного из них и измерении длительности заданного программным путем импульса.

Важным элементом узлов нижнего уровня является коммутатор. Для первых двух видов АЦП в ИСИ нецелесообразно использовать многоканальную структуру (индивидуальный измерительный канал для каждого сенсора), т.к. она не поддерживает самотестирования. Более совершенной является многоточечная структура, в которой выходы сенсоров подключаются к коммутатору сигналов сенсоров. Несмотря на усложнение конструкции коммутатора, самотестирование требует только дополнительного канала коммутатора и программной поддержки. АЦП частотно-временных сигналов не имеет аддитивной погрешности и для него оказывается целесообразной многоканальная структура.

Разнородные сенсоры требуют как разных АЦП, так и разных коммутаторов. При этом наблюдается корреляционная зависимость между требованиями к АЦП и к коммутатору. Это позволяет конструктивно объединить АЦП и коммутатор. Коммутатор АЦП напряжения низкого уровня должен обеспечить: максимальное коммутируемое напряжение - 10 В; максимальный коммутируемый ток - 20 мА; погрешность - не более 0.5...1 мкВ; количество каналов - не менее 8; время установки сигнала по одному каналу - не более 20 мс. Коммутатор быстродействующего АЦП должен обеспечить: максимальное коммутируемое напряжение - 10 В; максимальный коммутируемый ток - 20 мА; погрешность - 3...10 мкВ; количество каналов - не менее 8; время установки сигнала по одному каналу - не более 2 мкс. Анализ требований показал, что коммутатор АЦП напряжения низкого уровня должен выполняться на контактных элементах (герконовые реле), а коммутатор быстродействующего АЦП - на полевых транзисторах.

3. СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ ИСИ

Исходя из сформулированных в разделе 1 правил проектирования ИСИ основная обработка сигнала сенсора должна выполняться на среднем уровне. Требования к узлам среднего уровня можно условно разделить на внутренние и внешние. Главной целью внутренних требований является обеспечение высокого качества измерения за счет самообучения и адаптации к условиям измерения. Ее достижение - трудновыполнимая задача, ее решение может быть обеспечено только с помощью методов искусственного интеллекта. Так как основным критерием качества измерения служит его погрешность, в ИСИ результат измерения должен представляться совместно с его погрешностью. При этом погрешность должна быть индивидуальной характеристикой каждого результата измерения, а процедуры самообучения и адаптации должны обеспечивать заданную точность каждого канала измерения [12]. Для выполнения этих требований на нижних уровнях ИСИ должно быть предусмотрено выполнение следующих процедур:

1. Коррекция погрешности электрического тракта;
2. Расчет остаточной погрешности электрического тракта;
3. Прогнозирование поправки сенсора по индивидуальной математической модели дрейфа, учитывающей как текущее состояние, так и предыдущие, изменения влияющих величин, время эксплуатации;
4. Вычисление скорректированного результата измерения и его текущее хранение;
5. Прогнозирование погрешности прогноза поправки сенсора по индивидуальной математической модели;
6. Определение индивидуальной суммарной погрешности измерительного канала, сравнение ее с допустимой погрешностью;
7. При превышении индивидуальной погрешностью измерительного канала допустимого значения - выдача сообщения верхнему уровню;
8. Перевод (по инициативе верхнего уровня) канала, в котором погрешность выше нормы, в режим авто-

- калибровки по образцовому сенсору или специальному калибратору и передача верхнему уровню результатов;
9. Уточнение математических моделей дрейфа сенсора и погрешности прогноза поправки сенсора путем приема соответствующих сообщений верхнего уровня;
 10. Определение состояния объекта и формирование на его основе сообщений для базы знаний верхнего уровня.

Внешние требования к среднему уровню определяются его местом в иерархической структуре ИСИ [12] и выражаются следующими процедурами:

1. Поддержка достаточного количества каналов ввода/вывода, требования к протоколам обмена которых трудно определить заранее;
2. Расчет предварительного значения физической величины, соответствующей сигналу сенсора;
3. Выдача результатов измерения в соответствии с запросами верхнего уровня;
4. Поддержка средств организации человеко-машинного интерфейса (ограниченных функциями своего уровня).

Необходимо отметить, что внешние процедуры зависят от структуры канала и используемых в нем компонентов, а внутренние - от математических моделей, обеспечивающих вычисление поправок и погрешностей, которые индивидуальны для каждого канала. При этом часто необходимо использование индивидуальных математических моделей. Из изложенного видно, что требования к узлам среднего уровня трудно определить до этапа проектирования конкретного варианта ИСИ, более того, необходима возможность замены внутренних процедур во время функционирования ИСИ (адаптация и самообучение). Это достигается дистанционным перепрограммированием (реконфигурацией программного обеспечения) узлов среднего уровня [17].

Обобщенная структурно-функциональная схема узла обработки информации среднего уровня [17] представлена на рис. 1. Ее центральным элементом является микро-ЭВМ CPU типа 89C51. Необходимое быстродействие CPU определяется наиболее сложным алгоритмом обработки сигнала. Построение математических моделей осуществляется на верхнем уровне, а CPU только управляет нижним уровнем и использует готовые математические модели. Поэтому к быстродействию CPU в ИСИ высокие требования не предъявляются. ОЗУ (RAM) должно обеспечивать хранение системной управляющей программы узла, массивов текущей измерительной информации, набора программ их индивидуальной обработки, в том числе и математических моделей, загружаемых с верхнего уровня. Разрядность портов ввода-вывода (ORg/IRg) должна быть не меньше 16, их число – достаточным для подключения набора измерительных модулей и собственных периферийных устройств. Для обмена информацией с быстродействующими устройствами целесообразно использовать стандартный параллельный интерфейс (SYSTEM BUS). Адаптер последовательного интерфейса RS-232IFA поддерживает взаимодействие с верхним уровнем ИСИ. Порт P1 микро-ЭВМ и схема И & позволяют обрабатывать внешние маскированные и немаскированные прерывания. Дистанционное перепрограммирование узла достигается размещением во внутреннем ПЗУ микро-ЭВМ программы загрузки, которая при включении узла (в этот момент триггер Tg подает на вход ЕА "внутренняя/внешняя" программа признак "внутренняя") загружает в ОЗУ RAM программу последующей работы узла. При окончании загрузки программа загрузки обращается по первому зарезервированному адресу (расшифровывается Dc), что перебрасывает триггер Tg, который подает на вход ЕА "внутренняя/внешняя" программа признак "внешняя". Фронт срабатывания триггера выделяется формирователем F и служит для сброса микро-ЭВМ. После сброса микро-ЭВМ выполняет программу, расположенную в ОЗУ. Такое перепро-

граммирование возможно и в процессе работы микро-ЭВМ путем обращения по второму зарезервированному адресу, что перебрасывает триггер Tg, который подает на вход ЕА "внутренняя/внешняя" программа признак "внутренняя", а фронт срабатывания триггера сбрасывает микро-ЭВМ.

4. ВЕРХНИЙ УРОВЕНЬ ИСИ

Все функции, обеспечивающие свойства ИСИ на верхнем уровне, следует разделить на общего назначения и интеллектуальные. Функции общего назначения выполняют:

1. Обеспечение человеко-машинного интерфейса;
2. Организацию взаимодействия с узлами обработки информации среднего уровня;
3. Дистанционное перепрограммирование узлов среднего уровня;
4. Архивирование и защиту данных от несанкционированного использования.

Интеллектуальные функции подразумевают использование средств искусственного интеллекта для улучшения как результата, так и самого процесса измерения. Так как результат измерения на среднем уровне представлен как значение физической величины с погрешностью, то основной целью выполнения интеллектуальных функций на верхнем уровне является адаптация всей системы (за счет самообучения) к постоянно меняющимся условиям измерения для обеспечения заданной точности. Таким образом, интеллектуальные функции верхнего уровня по отношению к узлам среднего уровня могут быть представлены следующим набором процедур:

1. Прием результатов измерения в форме знаний о состоянии объекта измерения;
2. Прием сообщений о превышении индивидуальной погрешностью измерительного канала допустимого значения;
3. Передача решения о выбранном методе повышения точности и необходимых данных для его выполнения, а также прием результатов поверки или калибрования;
4. Уточнение индивидуальной математической модели дрейфа сенсора;
5. Уточнение временных ограничений индивидуальной математической модели дрейфа сенсора путем оценки качества предыдущего прогноза поправки;
6. Уточнение индивидуальной математической модели погрешности прогноза поправки сенсора путем обучения соответствующей нейронной сети;
7. Уточнение временных ограничений индивидуальной математической модели погрешности прогноза поправки сенсора путем оценки качества предыдущего прогноза погрешности поправки;
8. Передача уточненных математических моделей дрейфа сенсора и погрешности прогноза поправки сенсора, а также временных ограничений на их использование соответствующему узлу среднего уровня.

Выполнение перечисленных процедур обеспечивает индивидуальную адаптацию измерительных каналов ИСИ к дрейфу сенсоров и ее самообучение в процессе работы для обеспечения заданной точности измерения. Аппаратно верхний уровень представляет собой IBM-совместимый компьютер. Его программное обеспечение рассмотрено в [13].

5. ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрены пути реализации интеллектуальных систем измерения физических величин, обеспечивающих выполнение требований точности, надежности, универсальности и адаптивности за счет использования методов искусственного интеллекта.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит организацию INTAS за поддержку согласно гранта INTAS-OPEN-97-0606.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. http://www.honeywell.com/sensing/prodinfo/temperature/catalog/c15_93.pdf
2. Самсонов Г.В., Киц А.И., Кюздени О.А., "Датчики для измерения температуры в промышленности", Наукова думка, Киев, 1972
3. www.fluke.com/products/data_acquisition/hydra/home.asp?SID=7&AGID=0&PID=5308
4. Iyengar S.S. Distributed Sensor Network - Introduction to the Special Section // Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. – 1991. - Vol. 21, No.5. - P. 1027-1031.
5. Brignell E.J. Digital compensation of sensors/ Scientific Instruments. – 1987. - Vol. 20, No 9. - P. 1097-1102.
6. Jayasimha D.N., Iyengar S.S., Kashyap R.L. Information Integration and Synchronization in Distributed Sensor Networks // Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. – 1991. - Vol. 21, No.5. - P. 1032-1043.
7. K.B. Lee, R.D. Schneeman. Distributed Measurement and Control Based on the IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standards // Proceedings 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/99). – Venice (Italy). – 1999. - P. 608-613.
8. Kazakos D. Asymptotic Error Probability Expressions for Multihypothesis Testing Using Multisensor Data // Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. – 1991. - Vol. 21, No.5. - P. 1101-1114.
9. C.Alippi, A.Ferrero, V.Piuri. Artificial Intelligence for Instruments & Applications/ IEEE Instrumentation and Measurement Magazine. – June 1998. – P. 9-17.
10. A.Sachenko, V.Tymchyshyn. Low Cost Intelligent Module for Distributed Sensor Network/ Proc. of 4th Symposium Low Cost Automation "LCA'95". - Buenos Aires (Argentina). - 1995. - P.197-202.
11. Golovko V., Grandinetti L., Kochan V., Laopoulos T., Sachenko A., Turchenko V. Sensor Signal Processing Using Neural Networks/ Proc. IEEE Region 8 Intern. Conf. Africon'99. - Cape Town (South Africa). – 1999. - P. 339-344.
12. A.Sachenko, V.Kochan, V.Turchenko. Intelligent Distributed Sensor Network // Proceedings of 15th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/98). – St. Paul (USA). – 1998. - P. 60-66.
13. V.Golovko, L.Grandinetti, V.Kochan, T.Laopoulos, A.Sachenko, V.Turchenko, V.Tymchyshyn. Approach of an Intelligent Sensing Instrumentation Structure Development // Proc. IEEE Intern. Workshop on Intelligent Signal Processing (WISP'99). – Budapest (Hungary). – 1999. – P. 336-341.
14. Головки В.А. Нейроинтеллект: теория и применение. Книга 1: Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями. – Брест: Изд. БПИ, 1999. – 264 с.
15. V.Kochan, V.Tymchyshyn. Precision ADC module for IBM PC // Proc. 41.Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. - Ilmenau (Germany). - 1996. - P. 668-672.
16. A.Sachenko, V.Kochan, V.Turchenko, T.Laopoulos, V.Golovko. Using Neural Networks for Decreasing ADC Error/ Proc. IMEKO TC-4 Intern. Workshop of ADC Modelling and Testing (IWADC/99). – Bordeaux (France). – 1999. - P.78-81.
17. A.Sachenko, V.Kochan, V.Turchenko, V.Tymchyshyn, N.Vasylykiv. Intelligent Nodes for Distributed Sensor Network/ Proceedings 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/99). – Venice (Italy). – 1999. - P.1479-1484.

УДК 681.3

Саченко А.А., Кочан В.В., Коваль В.С.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СЛИЯНИЯ ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДИСТРИБУТИВНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

В последнее время получили значительное распространение интеллектуальные дистрибутивные сенсорные сети [2,17,18]. Результаты измерений всегда содержит погрешности, как систематические, так и случайные [3,6], поэтому действительные значения измерительных сигналов, в особенности, при обработке сигналов сенсоров, характеризуют с учетом интервалов неопределенности. Шумы, которые влияют на процесс измерения, имеют разную структуру, причем значительный удельный вес занимают погрешности случайной природы [3,4,6]. В отличие от других, случайные шумы не компенсируются калибровкой или поверкой [6], поэтому они вызывают наибольший интерес при статистической обработке информации. Методы статистической обработки данных, кроме определения случайной погрешности измеряемых данных, разрешают их усреднить и на основе него найти как более точный результат, так и его погрешность [6]. В таких условиях актуальной задачей есть слияние сенсорных данных

[2,17,18].

Слияние данных есть подходом к обработке данных, а под задачей слияния данных (data fusion), понимают технологию, благодаря которой большое количество различных данных может быть объединена в точное единое значение [10,12,13].

Среди известных методов сенсорного слияния данных можно выделить методы размытой логики [12], размытые меры с треугольной и Гаусовской формой распределения погрешностей сигнала [13], Байесовская статистика [7], искусственные нейронные сети [1], многовариантный анализ [11].

Для решения задачи сенсорного слияния данных, в методах статистической обработки информации используется множество алгоритмов [2,9,14,15,18], что позволяет осуществить такое объединение в точечной оценке (фиксированный момент времени). Тем не менее, эти алгоритмы имеют существенный недостаток, который состоит в сложности прогнозирования поведения исследуемого объекта. В работах [2,18]

Саченко Анатолий Алексеевич. Д.т.н., профессор, зав. каф. "Информационно-вычислительных систем и управления", директор Института компьютерных информационных технологий Тернопольской академии народного хозяйства.

Кочан Владимир Владимирович. К.т.н., доцент каф. Специализированных компьютерных систем Тернопольской академии народного хозяйства.

Коваль Василий Сергеевич. Преподаватель каф. "Информационно-вычислительных систем и управления" института компьютерных информационных технологий Тернопольской академии народного хозяйства