

3. **Avakyan A. A.** *Fizicheskaya model' i zakon raspredeleniya otkazov elementov i sistem elektroniki* (The physical model and the distribution law of failures of elements and electronics systems), *Proc. of the All-Russian NTK "XI Scientific Conference dedicated to the memory Zhukovsky*, Moscow, Publishing house of Academy named after N. E. Jukovskij, 2014, pp. 371—380 (in Russian).

4. **Asharina I. V.** *Sistemnoe vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie pri paralel'nom, raspredelennom i otkazoustoichivom reshenii v sisteme sovokupnosti vzaimodeistviyuyuschikh tselevykh zadach* (System coordination of mutual information in parallel, a distributed and fault-tolerant solutions in the system set of interacting targets), *Proceedings of the All-Russian NTK "XII Scientific Readings dedicated to the memory Zhukovsky*, Moscow, Publishing house of Academy named after N. E. Jukovskij, 2015, pp. 416—420 (in Russian).

5. **Bellman R., Zade L.** *Prinyatie reshenii v raspivchatelykh usloviyakh* (Decision-making in vague terms), Moscow, Mir, 1976, 229 p. (in Russian).

6. **Gerasimov O. N., Berineyazov N. A., Yurkov N. K.** *K voprosu zashchity elektronnykh sredstv LA ot vneshnikh vozdeystvii* (For the protection of electronic aircraft from external influences), *Proceedings of the All-Russian NTK "XII Scientific Readings dedicated to the memory Zhu-*

kovsky, Moscow, Publishing house of Academy named after N. E. Jukovskij, 2015, pp. 386—390 (in Russian).

7. **Dianov V. N.** *Integro-differentsial'naya diagnostika sboev v tsifrovoy apparature* (Integro-differential diagnostics of failures in digital equipment), *Proc. of the All-Russian NTK "XI Scientific Conference dedicated to the memory Zhukovsky*, Moscow, Publishing house of Academy named after N. E. Jukovskij, 2014, pp. 408—414 (in Russian).

8. **Lloid D., Lipov M.** *Nadezhnost': organizatsiya issledovaniy, metody, matematicheskii apparat* (Reliability: the organization of research methods, mathematical apparatus), Moscow, Sov. radio, 1964, 685 p. (in Russian).

9. **Utkin V. F., Kryuchkov Yu. V.** *Nadezhnost' i zhivuchest' sistem svyazi* (Reliability and survivability of communications systems), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 328 p. (in Russian).

10. **Sharakshane A. S., Khaletskii A. K., Morozov I. A.** *Otsenka kharakteristik slozhnykh avtomatizirovannykh sistem* (Evaluation of characteristics of complex automated systems), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 272 p. (in Russian).

11. **Shibanov G. P.** *Raspoznvanie v sistemakh avtokontrolya* (Recognition in the continuous measuring system), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 424 p. (in Russian).

УДК 681.5.09

DOI: 10.17587/mau.17.474-482

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

Особенности проектирования интеллектуальных компонентов систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики

Рассмотрены инженерные вопросы создания интеллектуальных компонентов, которые предназначаются для встраивания в системы оперативного управления и приборы цифровой автоматики. С использованием логико-математической модели управления выделены наиболее распространенные варианты распределения функций между интеллектуальными аппаратно-программными компонентами и персоналом при реализации циклов управления. Специфицированы важнейшие аспекты применения процессоров, операционных систем, программных средств и технологий обработки информации, анализ которых позволяет учитывать фактор времени, а также обеспечивать функционирование систем управления в условиях реально действующих ресурсных и иных ограничений.

Ключевые слова: системы управления, приборы автоматики, цифровые устройства, интеллектуальные компоненты, оперативный контроль, ресурсные ограничения

Введение

В последние десятилетия в научно-техническую литературу прочно вошло и утвердилось понятие "интеллектуальные системы", которое в большинстве случаев связывается с использованием различных технологий инженерии знаний [1, 2]. При достаточно широком в смысловом отношении исходном охвате интеллектуальных систем различного типа и функционального назначения область действия указанного понятия авторами публикаций в процессе анализа этих систем, как правило, значительно сужается. В ходе исследования конкретных инженерных вопросов в эту категорию в большинстве случаев отбираются системы, в которых с помощью специальных методов осуществляется представление и накопление знаний и фактов из рассматриваемых проблемных областей [3—5]. В пределах этих областей по соответствующим правилам обеспечивается выполнение выводов, а также синтез заключений и решений как резуль-

татов обработки запросов конечных потребителей информации.

В известной мере используется подход, который можно назвать академическим (в отличие от инженерного, проективного подхода), когда решение задач рассматривается вне каких-либо ограничений, налагаемых на времена реализации процессов, на ресурсные и массогабаритные характеристики аппаратуры и условия ее эксплуатации. При этом основное внимание в исследовании проблемы концентрируется преимущественно на тех или иных применяемых информационных технологиях. При такой постановке вопроса подобные системы могут рассматриваться как средства интеллектуальной поддержки процессов научных исследований или функционирования стационарных органов системного стратегического управления [6—8]. Из поля зрения исследователя и разработчика в данном случае выпадает крайне важное (особенно в практическом отношении) множество интеллектуальных компонентов, которые предназ-

начаются для встраивания в системы оперативного управления и приборы цифровой автоматики [5].

Структурное построение современных интеллектуальных компонентов для встраивания в системы оперативного управления и приборы цифровой автоматики требует применения таких типов процессоров, операционных систем, средств программного обеспечения и технологий обработки информации, которые способны учитывать фактор времени, а также обеспечивать функционирование систем в условиях реально действующих ресурсных и иных ограничений. В этих компонентах в качестве неотъемлемой составной части процессов выработки заключений и решений, разумеется, должен выступать обоснованный и осмысленный выбор между различными вариантами, что и приближает порядок реализации указанных процессов к структуре систем с искусственным интеллектом.

Логико-математическая модель анализа функций интеллектуальных компонентов системы

Анализ разнообразных интеллектуальных модулей для систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики и их разделение по функциональному признаку на группы, имеющие самостоятельное применение, позволяет следующим образом классифицировать указанные компоненты [5]:

- аппаратно-программные средства для обеспечения функционирования цифровых измерительно-информационных трактов;
- компоненты цифровой аппаратуры анализа спектров сигналов;
- цифровые блоки управления модуляторами, демодуляторами, излучателями и приемниками электромагнитных (в том числе инфракрасных) и ультразвуковых сигналов;
- цифровая аппаратура для установки в регуляторы и исполнительные механизмы;
- средства обеспечения требуемой достоверности передачи/приема цифровой информации по каналам связи в условиях помех;
- средства защиты информации от несанкционированного перехвата, использования или навязывания.

В системах оперативного управления и в приборах цифровой автоматики при любых обстоятельствах внешнего и внутреннего характера интеллектуальные компоненты должны создавать и поддерживать условия для выработки адекватных заключений и решений, направленных на достижение требуемых целей функционирования и управления. Здесь, прежде всего, следует учитывать возможность активного и своевременного воздействия на реальные физические процессы, а также наличие ресурсов, необходимых для эффективного функционирования, подготовки и осуществления управления.

Основная трудность в исследовании систем управления заключается в том, что даже при ограни-

ченной размерности системных уравнений достаточно сложно достоверно определить (идентифицировать) истинное текущее состояние объекта и системы управления и, следовательно, точно установить и оценить практическую достижимость более благоприятного состояния. Это обусловило объективную необходимость введения определенных допусков, налагаемых на значения параметров и характеристик реальных систем, а также установления уровней доверия к результатам инструментальных и субъективных измерений и оценок текущих состояний. Указанные допуски и уровни доверия могут быть сформированы только высококвалифицированными системными аналитиками в области создания и использования систем и приборов конкретного назначения.

В связи с этим возникает потребность в построении логико-математической модели функционирования систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики [9, 10], которая позволяла бы выделить циклически повторяющиеся процессы с последующей их функциональной декомпозицией и определением места и роли интеллектуальных компонентов в схемах обработки информации. В общей логико-математической модели функционирования систем целесообразно использовать постановку основной задачи исследования операций и следующие положения (А—Д) схемы циклического адаптивного управления [7—11].

А. В систему регулярно поступают актуальные значения результатов инструментального или субъективного наблюдения текущих объемно-временных параметров вещества, энергии и информации, параметров состояний объекта управления и системы, а также параметров воздействий внешней среды $X = \{X_i(t)\}$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Б. Для достижения требуемой цели органом управления на интервалах времени T циклически вырабатываются управленческие решения $V_r(t)$, которые должны быть обоснованы и выбраны из некоторого множества возможных альтернативных управлений $\{V_r(t)\}$, $r = 1, 2, \dots, R$, в соответствии с оценками текущих состояний $S(t)$ объекта управления и системы.

В. Текущее состояние $S(t)$ объекта управления и системы должно удовлетворять некоторому уравнению или группе уравнений, которые в общем случае зависят от текущих наблюдений $X = \{X_i(t)\}$ и от управленческих решений $V_r(t - \tau_{цв})$, принятых в предыдущих циклах управления: $S(t) = S[X = \{x(t)\}; V_r(t - \tau_{цв})]$; $\tau_{цв}$ — длительность цикла управления.

Г. В системе планируются и вырабатываются управляющие воздействия $Y = \{Y_q(t)\}$, $q = 1, 2, \dots, n$, — реакции системы, соответствующие управленческим решениям $V_r(t)$, принятым на интервалах времени T .

Д. Для системы определен или задан интегральный критерий эффективности управления E .

Управленческое решение $V_r(t)$ на интервале времени T должно обеспечивать достижение требуе-

мой цели (группы целей) при условии выполнения действий за допустимое время, равное длительности цикла управления $\tau_{цУ}$, получения экстремального значения (максимума или минимума) интегрального критерия эффективности управления E_{extr} или размещения его значения в требуемом интервале значений (E_{inf}, E_{sup}). В общей логико-математической модели функционирования объект управления, систему и внешнюю среду при их взаимодействиях в процессах функционирования следует рассматривать как единый системотехнический комплекс.

Конкретное применение общей логико-математической модели зависит от специфических особенностей построения систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики, а также от применяемых схем разделения функций в органах управления. В табл. 1 представлены наиболее распространенные варианты распределения функций между интеллектуальными аппаратно-программными компонентами и персоналом при реализации циклов управления.

Для формирования управленческих решений могут применяться как безлюдные технологии, так и рациональные комбинированные варианты, сочетающие интеллектуальные возможности аппаратно-программных средств и интеллект персонала. Системы, в которых используется интеллект персонала, относятся к категории эргатических. В своем составе они должны содержать и предоставлять в распоряжение операторов пульты, дисплеи, панели, а также программные средства поддержки информационного взаимодействия и контроля проводимых операций.

Предварительно до начала процесса штатной эксплуатации в технологическом режиме в интеллектуальные компоненты должны быть введены: необходимая нормативно-справочная информация;

значения допустимых диапазонов изменения физических величин; различные системные константы. Результаты инструментального или субъективного наблюдения текущих параметров $X = \{X_i(t)\}$ в процессе штатной эксплуатации, как правило, поступают в интеллектуальные компоненты в виде последовательностей фактографических транзакций. Их совокупность обеспечивает развертывание по времени каждого параметра $X_i(t)$ значения (отсчеты) соответствующей решетчатой функции $X_i[t_0(Q), t = t_0(Q) + k\Delta t]$ с образованием окна сканирования. Здесь $Q = 1, 2, \dots$ — текущий номер полосы сканирования; $t_0(Q) = (Q - 1)K\Delta t$ — значение начального времени отсчета полосы сканирования с номером Q ; K — число отсчетов в полосе сканирования; Δt — шаг по времени формирования отсчетов, определяемый теоремой Котельникова—Найквиста. Для ряда систем используется одна полоса сканирования, при этом $Q = 1$.

Приведенные сведения, а также алгоритмы обработки, нормативно-справочные данные и необходимые технические характеристики, системные константы и другие подобные информационные объекты должны быть специальным образом организованы в интеллектуальных компонентах и должны храниться в виде декларативных знаний, допускающих непосредственный доступ [3]. Правильная смысловая интерпретация значений параметров в интеллектуальных компонентах в течение установленных допустимых интервалов времени может быть достигнута путем обеспечения на стадиях проектирования полного соответствия логических структур внешних транзакций и внутренних информационных структур [12]. Они должны обладать свойством однозначного взаимного отображения (т. е. быть биективными).

Наилучший эффект по скорости поиска и отбора необходимых сведений при выполнении операций

Таблица 1

Распределение функций между интеллектуальными аппаратно-программными компонентами и персоналом

Приборы систем оперативного управления и цифровой автоматики	Аппаратно-программные интеллектуальные компоненты органа управления	Роль и участие персонала в реализации управления
Цифровые приборы измерительных и информационных трактов	Компонент цифровой обработки сигналов	Оперативный контроль; проведение периодических тестовых проверок
Цифровая аппаратура анализа спектров сигналов	Компонент реализации дискретного разложения и дискретного преобразования Фурье	Оперативный контроль; управление экспериментами; задание режимов спектрального анализа
Цифровые блоки управления модуляторами, демодуляторами, излучателями и приемниками физических сигналов	Компонент цифрового канального кодирования и фильтрации сигналов	—
Цифровая аппаратура для установки в регуляторы и исполнительные механизмы	Компонент реализации алгоритмов цифрового управления и регулирования	Оперативный контроль; проведение периодических тестовых проверок; задание режимов функционирования
Цифровые средства обеспечения требуемой достоверности передачи/приема информации по различным каналам в условиях помех	Компонент цифрового канального кодирования и фильтрации сигналов, а также алгоритмы обработки сигналов локации	—
Цифровые средства защиты информации от несанкционированного перехвата, использования или навязывания	Компонент криптографической защиты	Оперативный контроль; проведение периодических тестовых проверок; установка и замена ключей криптографической защиты

обработки, накопления или обновления значений параметров может быть достигнут при использовании в качестве ключей поиска обычных числовых кодов информационных объектов (например, порядковых номеров), но не символьных идентификаторов. Нормативно-справочным данным, необходимым техническим характеристикам и системным константам целесообразно присваивать статус условно-постоянной информации и размещать их в унарных отношениях с доменными числами $d = 1$ для предоставления возможности изменения хранимых значений с помощью команд-предписаний в технологическом режиме.

Для записи, хранения, обработки, передачи и использования декларативных знаний в процессах системного управления проводится их предварительная формализация [3, 12]. Процедурные и неформализованные знания следует использовать крайне редко, по крайней мере, на стадиях проектирования целесообразно принять меры по минимизации потребностей в этой информации. Введение процедурных и неформализованных видов знаний в интеллектуальные компоненты обычно сопровождается увеличением времени доступа к виртуальным информационным элементам.

Все интеллектуальные компоненты включают в свой состав аппаратно-программные средства, обладающие свойствами дедуктивного формирования адекватных решений. Данные решения формируются за счет использования фактографической системной информации, а также схем семантического и логического анализа, предварительно обобщенных и представленных в виде алгоритмов и соответствующих процессорных программ.

Обоснование выбора алгоритма обработки информации в интеллектуальных компонентах системы

Алгоритмы обработки и преобразования информации, применяемые в различных интеллектуальных компонентах систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики, непосредственно связаны с их функциональной направленностью и, по сути, реализуют процессы анализа текущих состояний и выработки управленческих решений. Наиболее используемый состав указанных алгоритмов представлен в табл. 2.

Предположим, что для обработки отсчетов окна сканирования каждого типа параметров X_i применяется индивидуальный алгоритм A_j . Структурный анализ показал, что практически все представленные алгоритмы обладают специфическим и достаточно полезным свойством: они допускают функциональную декомпозицию с выделением одного набора или ограниченного числа наборов типовых функциональных действий и преобразований, индивидуальных для каждого алгоритма, которые могут в определенной последовательности связываться друг с другом и образовывать структуру алгоритма. Последнее означает, что каждый алгоритм A_j в принципе может быть интерпретирован как L_j — шаговый процесс выполнения индивидуального базового набора процессорных инструкций B_j , при этом $A_j \in \{A_{ij}\}$, $L_j \in \{L_{ij}\}$, $B_j \in \{B_{ij}\}$; $j, i = 1, 2, \dots, m$.

Для эффективной реализации алгоритмов интеллектуальных компонентов принципиальное значение имеет обоснованный выбор типов процессоров $\{Prc_h\}$, $h = 1, 2, 3, \dots$, по совокупности технических характеристик. Из всех характеристик

Таблица 2

Состав алгоритмов обработки и преобразования информации в интеллектуальных компонентах систем

Аппаратно-программные интеллектуальные компоненты органа управления	Наиболее используемый состав алгоритмов обработки и преобразования информации
Компонент цифровой обработки сигналов	1. Алгоритмы точечного контроля нахождения значений параметров или характеристик, поступивших на обработку или преобразование, в заданных границах (предупредительных и аварийных). 2. Дискретные алгоритмы предварительного сглаживания и фильтрации. 3. Дискретные алгоритмы вычисления корреляции
Компонент реализации дискретного разложения и дискретного преобразования Фурье	1. Дискретизированное по времени разложение Фурье с использованием схемы Бесселя. 2. Дискретное быстрое преобразование Фурье с прореживанием по времени. 3. Дискретное быстрое преобразование Фурье с прореживанием по частотам. 4. Дискретное преобразование Хартли
Компонент цифрового канального кодирования и фильтрации сигналов, а также обработки сигналов локации	1. Алгоритмы управления импульсно-кодовой модуляцией/демодуляцией и N-QAM манипулированием сигналов. 2. Дискретные алгоритмы реализации линейных фильтров. 3. Дискретные алгоритмы оптимальной фильтрации Винера—Хопфа
Компонент реализации алгоритмов цифрового управления и регулирования	1. Дискретные алгоритмы сглаживания. 2. Дискретные алгоритмы вычисления свертки с предварительным рациональным секвестированием импульсных характеристик звеньев управления и регулирования
Компонент помехоустойчивого кодирования и декодирования информации	1. Алгоритмы реализации непрерывного помехоустойчивого кодирования дискретной информации. 2. Алгоритмы реализации блочного кодирования дискретной информации
Компонент криптографической защиты	1. Алгоритм шифрования дискретной информации — ГОСТ 28147—84. 2. Алгоритмы шифрования дискретной информации Data Encryption Standard (DES) и Advanced Encryption Standard (AES)

необходимо особо выделить: архитектуру процессора; длину его разрядной сетки; состав процессорных команд (инструкций); тактовую частоту; объемы оперативной и постоянной памяти; число и типы портов для обеспечения ввода—вывода информации; уровень потребления электроэнергии; уровень выделения тепловой энергии; массогабаритные характеристики; допустимые электромагнитные, механические и климатические воздействия; наличие технологических средств разработки и отладки программ с использованием универсальных компьютеров; стоимость.

В этом перечне выделяются характеристики доминирующей группы, которая включает архитектуру процессора, длину его разрядной сетки, состав процессорных команд и тактовую частоту. Следует отметить, что объемы адресного пространства оперативной и внешней памяти зависят от разрядности процессора. Достаточно самостоятельными техническими характеристиками являются число портов, наличие технологических средств разработки и отладки программ. Практически все остальные технические показатели зависят от доминирующей группы характеристик и устанавливаются паспортными данными процессора. Большинство современных процессоров имеет гарвардскую архитектуру и реализует различные схемы конвейерной обработки процессорных инструкций (команд). Длина разрядной сетки и состав процессорных команд определяют точность вычислений.

В процессорах, применяемых для оснащения интеллектуальных компонентов, которые ориентированы на реализацию алгоритмов управления импульсно-кодовой модуляцией/демодуляцией и N-QAM манипулированием сигналами, а также алгоритмов помехоустойчивого кодирования/декодирования информации и ее криптографической защиты, целесообразно использование разрядных сеток процессоров длиной 16 или 32 бит и редуцированный набор команд (reduced instruction set computing — RISC). За счет применения фиксированного формата команд, большого числа универсальных регистров и минимизации обращений к памяти в RISC-процессорах удается существенно сократить продолжительность командных циклов. При этом для рассматриваемых алгоритмов команды выполнения операций с плавающей точкой и операции над октетами (символами) практически оказываются не востребованными и могут не входить в набор инструкций процессора.

В процессорах, применяемых для оснащения интеллектуальных компонентов, которые ориентированы на реализацию всех остальных типов алгоритмов, для обеспечения требуемой точности вычислений необходимо использование 32-, 48-, 64-битовых разрядных сеток и полного комплекта команд (complex instruction set computing — CISC). Такой выбор обусловлен тем, что редуцированный набор команд и дополнительный отказ от применения операций с плавающей точкой при проекти-

ровании программного обеспечения оборачивается усложнением логики процессов и необходимостью введения в алгоритмы коэффициентов масштабирования. Это существенно удлиняет программы, что при больших объемах вычислений делает программное обеспечение трудночитаемым и тяжело модифицируемым. В той или иной степени может наблюдаться потеря ожидаемого выигрыша по времени реализации алгоритмов.

Особую значимость имеет обоснование требуемой тактовой частоты процессора, от значения которой зависит не только время реализации алгоритмов, но и объемы потребления процессором электрической и рассеивания тепловой энергии. Эти характеристики, в свою очередь, влияют на конструкторско-технологическое построение интеллектуальных компонентов.

Будем полагать, что для интеллектуального компонента задано множество алгоритмов $\{A_j\}$ обработки и преобразования информации, а также нормативные времена реализации указанных алгоритмов на процессоре $\{\tau_j\}$. Если расщепление алгоритмов на индивидуальные базовые наборы процессорных инструкций проведено, для любого алгоритма A_j число повторений L_j базового набора фиксированных по составу процессорных инструкций $B_j = \{I_{j\alpha}, I_{j\beta}, I_{j\gamma}, \dots, I_{j\delta}\}$ должно быть выполнено за время, не превышающее нормативное $\tau_j \in \{\tau_j\}$.

Значение L_j — это вычислительная сложность алгоритма A_j , измеренная в числе индивидуальных базовых наборов процессорных инструкций B_j . Для различных типов процессоров $\{Prc_h\}$, как правило, имеются паспортные или иные документальные сведения о числе тактов в циклах выполнения конкретных процессорных инструкций. Это позволяет определить ожидаемое число тактов $D_{hj} = \{D_{hj\alpha}, D_{hj\beta}, D_{hj\gamma}, \dots, D_{hj\delta}\}$, необходимое для реализации процессорных инструкций из наборов B_j с учетом конкретной архитектуры процессоров $\{Prc_h\}$. Таким образом, можно оценить ожидаемую тактовую емкость базовых наборов для каждого из типов процессоров, т. е. число тактов D_{hj} процессора Prc_h с конкретной архитектурой, которые необходимо выполнить для реализации того или иного набора B_j :

$$\{D_{hj} = D_{hj\alpha} + D_{hj\beta} + D_{hj\gamma} + \dots + D_{hj\delta}\}.$$

Тактовая частота в расчете на реализацию алгоритма A_j за нормативное время τ_j оценивается следующим соотношением:

$$F_{hj} = L_j D_{hj} / \tau_j,$$

где $D_{hj} = D_{hj\alpha} + D_{hj\beta} + D_{hj\gamma} + \dots + D_{hj\delta}$.

Поскольку процессор Prc_h может быть ориентирован на реализацию нескольких алгоритмов, следует выбирать максимальное значение из соответствующих тактовых частот. Последнее расчетное соотношение дает верхнее значение тактовой частоты процессора для последовательного исполнения тактов в каждом командном цикле процессора

и последовательного исполнения инструкций в пределах каждого набора V_j . В это соотношение могут вводиться коэффициенты сжатия, которые для определенных типов процессоров непосредственно задаются в эксплуатационной документации и отражают возможные деформации командных циклов за счет применения конвейерной обработки инструкций. Дополнительные уточнения могут быть сделаны в процессе предварительного компьютерного моделирования алгоритмов и оценки возможностей по распараллеливанию вычислений. Выявление базовых наборов процессорных инструкций V_j , основанное на анализе алгоритмов, при устоявшейся алгоритмической основе, как правило, дает хорошие или, по крайней мере, удовлетворительные результаты.

Пример расчета минимально допустимой тактовой частоты. Для алгоритма вычисления дискретной свертки решетчатого оригинала $\{X_i|t = t_0 + k\Delta t\}$, $k = 0, 1, 2, \dots, K_X$, и секвестированной решетчатой импульсной характеристики звена управления $\{H|k\Delta t\}$, $k = 0, 1, 2, \dots, K_H$, индивидуальный базовый набор процессорных инструкций может иметь следующий состав:

- инструкция чтения требуемого значения решетчатого оригинала $X_i|t = t_0 + k\Delta t$ на один из регистров процессора;
- инструкция чтения соответствующего значения решетчатой импульсной характеристики $\{H|(k - q)\Delta t\}$, $k = 0, 1, 2, \dots, K_H$, на один из регистров процессора;
- инструкция умножения с плавающей точкой требуемого значения решетчатого оригинала на соответствующее значение решетчатой импульсной характеристики;
- инструкция сложения с плавающей точкой полученного произведения $\{X_i|t = t_0 + k\Delta t\}\{H|(k - q)\Delta t\}$ со значением накапливаемой текущей суммы.

Вычислительная сложность алгоритма вычисления дискретной свертки для $(K_X + 1) + (K_H + 1) - 1$ значений, которая измеряется числом индивидуальных базовых наборов приведенных выше процессорных инструкций, определяется следующим выражением:

$$L = L_{i1} + L_{i2} + L_{i3},$$

где L_{i1} , L_{i3} — частные суммы двух арифметических прогрессий;

$$L_{i1} = \{1 + \min(K_X + 1, K_H + 1)\} \times \{\min(K_X + 1, K_H + 1)\}/2,$$

$$L_{i2} = |K_X - K_H|\{\min(K_X + 1, K_H + 1)\},$$

$$L_{i3} = \{1 + |K_X - K_H|\}K_X - K_H/2.$$

При $K_X = 12$, $K_H = 7$, $\tau = 25,0$ мкс свертка будет представляться 20 дискретными значениями с $L_{i1} = 36$, $L_{i2} = 40$, $L_{i3} = 15$, а общая вычислительная сложность может быть оценена на уровне $L = 91$. Для многих типов процессоров тактовая емкость приведенных выше инструкций составляет 3; 3; 4;

6 тактов соответственно, а $D_h = 16$. При этих параметрах тактовая частота процессора должна быть не ниже расчетного значения $F_{hj} = 582,4$ МГц.

Этот алгоритм теоретически допускает распараллеливание на $(K_X + 1) + (K_H + 1) - 1$ независимых ветвей, соответствующих расчетам отдельных значений свертки. При теоретически полном распараллеливании максимальная вычислительная сложность одной ветви составит $L_{\max} = \min(K_X + 1, K_H + 1) = 5$, а необходимая расчетная тактовая частота будет равна минимально допустимому значению $F_{hj \min} = 32,0$ МГц. В частотном отношении это самый благоприятный вариант реализации алгоритма свертки.

Однако применение многоядерных процессоров приводит к росту энергетических затрат и к необходимости поиска рациональных компромиссов. Этот вывод относится и к случаю использования многих других алгоритмов. (Здесь уместно отметить, что из всех рассматриваемых в данной работе алгоритмов наиболее высокой вычислительной емкостью обладают алгоритмы фильтрации Винера—Хопфа.)

Выбор процессоров и операционных систем для реализации высокопроизводительных интеллектуальных модулей

Сведения о целесообразных составах базовых наборов процессорных инструкций и об ожидаемой вычислительной сложности для алгоритмов точечных преобразований, для быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени и по частотам, для преобразования Хартли и некоторых других алгоритмов изложены в работе [13]. Указанные сведения целесообразно, по нашему мнению, дополнить анализом типов операционных систем процессоров, которые могут обеспечить реализацию функций управления в условиях реально действующих ресурсных (в первую очередь временных) ограничений.

В настоящее время на рынке процессоров для высокопроизводительных систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики представлен широкий спектр продукции ряда компаний США (Intel, IBM, Analog Devices, Atmel Corp., MicroChip, Motorola, Hewlett—Packard), Японии (NEC Electronics Corp., Renesas, Mitsubishi Electric Corp.), России (ГП "НИИ электронной техники"). В высокопроизводительные вычислительные системы и приборы цифровой автоматики начинают активно внедряться 64-разрядные процессоры, что позволяет значительно увеличить объемы памяти с прямым адресованием, повысить скорость и точность вычислений.

Анализ обобщенных характеристик, доступных для использования в интеллектуальных компонентах типовых представителей семейства сигнальных процессоров компаний Analog Devise и Texas Instruments, а также встраиваемых процессоров компаний Intel и AMD, выполненный по материалам на-

Основные характеристики типовых сигнальных и встраиваемых процессоров для высокопроизводительных систем

Модель процессора	Кодовое наименование процессорного ядра	Тактовая частота процессора, МГц	Разрядность, бит	Объем адресного пространства памяти, Кбайт	Быстродействие, Мflops/ММАС	Рассеиваемая мощность, Вт
Analog Devise ADSP 21060	SHARC SISD	100	32	4000	300/—	0,1...0,5
Analog Devise ADSP 21060	SHARC SIMD	100	32	4000	600/—	0,1...0,5
Analog Devise ADSP—TS001	Tiger SHARC	150	32	4000	900/—	0,1...0,5
Analog Devise ADSP—BF533	Blackfin	600	32	4000	—/1200	0,1...0,5
Texas Instruments TMS 320C6X	—	200	32	4000	600/—	0,1...0,5
Intel Atom N270, D150	Atom	1600	64	1024	3200/—	20...30
Intel Core i3—2350M	Core	2300	64	1024	36 800/—	60...65
AMD Athlon 64 X2 5400	Athlon	2800	64	1024	8000/—	60...65
AMD Athlon II X4 640	Athlon	3000	64	1024	37 400/—	65...75

учно-технических публикаций, представлен в табл. 3. Приведенные значения основных параметров (тактовой частоты, разрядности, быстродействия и других) вполне характеризуют функциональные возможности современных процессорных технологий.

Создание интеллектуальных компонентов систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики существенно упрощается за счет системного применения встраиваемых процессоров. Однако замещение сигнальных процессоров встраиваемыми сопровождается ростом стоимости и энергопотребления интеллектуальных средств, причем приведенные характеристики для указанных процессоров могут различаться на порядок. Кроме того, следует указать на оценочный характер значений рассеиваемой мощности, так как производители обычно публикуют "типичные" и "максимальные" значения характеристики, не уточняя смысл этих понятий.

Характеристики проектируемых систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики прямым образом зависят от типа операционных систем, применяемых для оснащения процессоров. Операционная система является комплексом привилегированных программ, обеспечивающих управление ресурсами процессора и выполнением программ прикладных функциональных задач, использующих эти ресурсы при реализации вычислений. Ресурсами в данном контексте являются процессорное время, оперативная память, каналы и аппаратура ввода/вывода данных и различные сведения из состава декларативных знаний.

Управление ресурсами сводится к рациональному их распределению между активными функциональными задачами. Реализация указанных функций позволяет "спрятать" аппаратные особенности процессора и, тем самым, предоставить в распоряжение программиста виртуальную машину с существенно облегченным управлением. Управление программами предполагает их активизацию в соответствии с заранее установленными приоритетами запросов на решение тех или иных функциональных задач [14]. Платой за внедрение этих программных механизмов общего назначения явля-

ется сложность комплексирования и отладки всего программного обеспечения интеллектуального компонента системы.

В настоящее время существует большое разнообразие операционных систем, но для интеллектуальных компонентов оперативного управления и приборов цифровой автоматики первостепенное значение имеет использование операционных систем реального времени (RTOS — real time operating system), которые должны обеспечивать гарантированное время ответа на внешние события. Интеллектуальный компонент работает в реальном времени, если времена выработки реакций системы адекватны скорости протекания физических процессов и лежат в интервале 10...100 мкс, а для некоторых менее ответственных процессов этот интервал расширяется до 1 мс.

Среди современных операционных систем имеется класс продуктов, разработанных специально для построения систем жесткого реального времени, в том числе VxWorks, Nucleus, OS9, QNX, LynuxOS, OSE. Эти системы содержат необходимый состав управленческих программных инструментов, состав и значения времени реакции которых в большинстве случаев определяют выбор операционной системы. Однако достаточно часто требования к функции реального времени допускают компромиссы, особенно если необходимо добиться только нужной средней производительности процессора и установленного в нем программного обеспечения. Среди указанных систем наиболее удачными эксплуатационными характеристиками обладают операционные системы VxWorks [15] и Nucleus [16].

Операционная система реального времени VxWorks и инструментальная среда Tornado компании Wind River Systems предназначены для разработки программного обеспечения встраиваемых интеллектуальных компонентов, работающих в системах жесткого реального времени. Она является системой с кросс-средствами разработки прикладного программного обеспечения, при этом разработка ведется на инструментальном компьютере в среде Tornado для последующего переноса исполнения программ на штатный процессор.

Операционная система VxWorks построена по технологии микроядра; на нижнем непрерываемом уровне ядра выполняются только базовые функции планирования функциональных задач и их управления коммуникацией и синхронизацией. Все остальные функции операционной системы более высокого уровня (управление памятью, вводом/выводом, сетевые средства) базируются на простых функциях нижнего уровня. Это позволяет обеспечить приоритетную обработку запросов, быстрое действие и детерминированность ядра, а также строить необходимую конфигурацию операционной системы.

Все аппаратно-зависимые части VxWorks вынесены в отдельные модули для того, чтобы разработчик встраиваемой процессорной системы мог портировать VxWorks на свой целевой процессор. Специально для систем, использующих процессоры с сильно ограниченными объемами памяти, компания Wind River Systems разработала редуцированное ядро WindStream, которое требует для работы не более 8 Кбайт постоянного запоминающего устройства и 2 Кбайт оперативной памяти.

Операционная система реального времени Nucleus подразделения Accelerated Systems компании Mentor Graphic является системой с открытыми и документированными кодами для разработки программного обеспечения, работающего в системах жесткого реального времени. Она обеспечивает приоритетную обработку запросов, обладает масштабируемостью, гибкостью и переносимостью. Поддерживается функционирование более чем на 70 типах процессорных платформ. Система располагает кросс-средствами разработки прикладного программного обеспечения на инструментальном компьютере и средствами последующего переноса на штатный процессор. Как и в системе VxWorks, все аппаратно-зависимые части Nucleus разработчик может портировать на свой целевой процессор.

Заключение

В последнее время специалисты по интеллектуальным системам сосредоточены преимущественно на создании средств интеллектуальной поддержки процессов научных исследований и функционирования органов системного стратегического управления. При этом из поля зрения выпадает важное в практическом отношении множество интеллектуальных компонентов, которые предназначены для встраивания в системы оперативного управления и приборы цифровой автоматики. Структурное построение указанных интеллектуальных модулей требует применения таких типов процессоров, операционных систем, средств программного обеспечения и технологий обработки информации, которые способны учитывать фактор времени, а также обеспечивать функционирование систем в условиях реально действующих ограничений.

С учетом этого проведен комплексный анализ особенностей проектирования интеллектуальных компонентов для систем оперативного управления и приборов цифровой автоматики. Определен наиболее употребительный состав алгоритмов обработки и преобразования информации указанными интеллектуальными модулями, а также выделены наиболее распространенные варианты распределения функций между интеллектуальными аппаратно-программными компонентами и персоналом при реализации циклов управления. Для выбора процессора по его тактовой частоте при реализации указанных алгоритмов предложена технология расщепления алгоритмов на индивидуальные базовые наборы процессорных инструкций и оценки необходимого числа процессорных тактов их реализации.

Проведен анализ основных характеристик типовых процессоров, доступных для использования в интеллектуальных компонентах рассматриваемых систем. Замещение сигнальных процессоров на встраиваемые упрощает создание интеллектуальных модулей, однако это сопровождается ростом стоимости и энергопотребления интеллектуальных средств, причем эти характеристики для указанных типов процессоров могут различаться на порядок. Показано, что интеллектуальные модули работают в режиме реального времени, если время выработки реакции адекватно скорости протекания физических процессов и лежит в интервале от 10 до 100 мкс, а для менее ответственных процессов — до 1 мс. Анализ состава управленческих программных инструментов, состава и времени реакции операционных систем позволил сделать выбор вариантов систем, обладающих наиболее удачными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Хант Э. Искусственный интеллект. М.: Мир, 1978. 558 с.
2. Дейт Д. Введение в системы баз данных. М.: Вильямс, 2006. 1328 с.
3. Рыбина Г. В. Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика, 2010. 432 с.
4. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. М.: Мир, 1991. 570 с.
5. Гулай А. В., Зайцев В. М. Интеллектуальные системы технического назначения: функциональная классификация // Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. "Ключевые вопросы современной науки", София. 17–25 апреля 2013. Т. 34. С. 5–11.
6. Гулай А. В., Зайцев В. М. Интеллектуальные технологии синтеза стратегических решений при создании сложных систем // Электроника-инфо. 2014. № 5. С. 24–27.
7. Гулай А. В., Зайцев В. М. Эвристико-алгоритмические методы в интеллектуальных технологиях проектирования системотехнических комплексов // Новый университет. 2014. № 2. С. 7–11.
8. Гулай А. В., Зайцев В. М. Экспертная логико-вероятностная модель интеллектуальной системы управления // Наука и техника. 2014. № 1. С. 30–37.
9. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Системотехника. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.
10. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
11. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Наука, 1988. 208 с.

12. Гулай А. В., Зайцев В. М. Интеллектуальные мехатронные системы с дистанционной организацией транзакций: особенности построения // Доклады БГУИР. 2015. № 7. С. 92—98.

13. Тропченко А. Ю., Тропченко А. А. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. СПб.: ГУИТМО, 2009. 100 с.

14. Танненбаум Э. Современные операционные системы. СПб.: Питер, 2002. 1041 с.

15. Сайлер Г. Операционная система VxWorks и Wind River Linux: подходы к реализации реального времени // Современные технологии автоматизации. 2011. № 3. С. 14—18.

16. Операционная система Nucleus—PC Week/RE. URL: www.pcweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=47517.

Design Peculiarities of the Intellectual Components of the Operational Control Systems and Digital Automation Devices

A. Gulay, is@bntu.by✉, V. Zaitsev, is@bntu.by,
Belorussian National Technical University, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author: **Gulay Anatoly V.**, Ph. D., Associate Professor, Chief of Department, Belorussian National Technical University, Minsk, 220013, Belarus
e-mail: is@bntu.by

Received on January 27, 2015

Accepted on February 10, 2015

Presently, when intellectual systems are being established, the solutions to certain logical problems are considered without any limitations concerning the periods of implementation, the resource and mass-dimensional specifications of the equipment, as well as its operation terms. Being so, numerous practically important intellectual components, intended for functioning as a part of the operational control systems and digital automation devices, fall out of the vision field. Therefore, this paper is aimed at determination of the design peculiarities of the intellectual modules of the above systems, which are capable of taking into account the time factor, as well as functioning in the conditions of the really existing resources and other limitations. Distribution of functions for information processing between the software-hardware and the personnel of the system is an original solution of the set problem. By using the logical and mathematical control model a list of the most widespread options of functions' distribution and a list of algorithms were formed for the use in the intellectual components of highly productive systems. Engineering approaches were proposed for assessment of the specifications of the processors, operational systems, software and information processing technologies, when the time factor is taken into account and prerequisites are provided for functioning of the intellectual modules in the conditions of limited resources.

Keywords: control systems; automation devices; digital devices; intellectual components; operational control; resource limitations

For citation:

Gulay A., Zaitsev V. Design Peculiarities of the Intellectual Components of the Operational Control Systems and Digital Automation Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 474—482.

DOI: 10.17587/mau.17.474-482

References

1. **Hunt E.** *Iskusstvennyy intellekt* (Artificial Intelligence), Moscow, Mir, 1978, 560 p. (**Hunt E.** Artificial Intelligence, N. Y., Academic Press, 1975, 468 p.)

2. **Date D.** *Vvedenie v sistemy baz dannykh* (Introduction to Database Systems), Moscow, Vil'jams, 2006, 1328 p. (**Date C. J.** Introduction to Database Systems, N. J., Pearson Education, 2004, 983 p.)

3. **Rybina G. V.** *Osnovy postroeniya intellektual'nykh sistem* (Fundamentals of Intellectual System Construction), Moscow, Finansy i statistika, 2010, 432 p.

4. **Lor'er G.-L.** *Sistemy iskusstvennogo intellekta* (Intelligence artificielle), Moscow, Mir, 1991, 570 p. (**Lauriere J.-L.** Intelligence artificielle, Paris, Eurolles, 1987, 485 p.)

5. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Intellektual'nye sistemy tekhnikeskogo naznatsheniya: funktsional'naya klassifikatsiya* (Intellectual systems of technical intention: functional classification), *Proc. of IXth Internat. Research-to-Practical Conf. "Key issues of the contemporary science"*, 17—25 April 2013, Sofija, vol. 34, pp. 5—11.

6. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Intellektnyye tehnologii sinteza strategicheskikh reshenij pri sozdanii slozhnykh sistem* (Intellectual technologies of synthesis of strategic solutions when complex systems are created), *Elektronika-info*, 2014, no. 5, pp. 24—27.

7. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Evrstiko-algoritmicheskie metody v intellektnykh tehnologiyakh proektirovaniya sistemotehnicheskikh kompleksov* (Heuristic and algorithmic methods in intelligent technologies of systems engineering complex design), *Novyy universitet*, 2014, no. 2, pp. 7—11.

8. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Ekspertnaya logiko-veroyatnostnaya model' intellektual'noy sistemy upravleniya* (Expert logical and probabilistic model of intellectual control system), *Nauka i Tekhnika*, 2014, no. 1, pp. 30—37.

9. **Druginin V. V., Kontorov D. S.** *Sistemotekhnika* (System Engineering), Moscow, Radio i svjaz', 1985, 200 p.

10. **Nikolaev V. I., Bruck V. M.** *Sistemotekhnika: metody i prilozheniya* (System Engineering: Methods and Applications), Leningrad, Mashinostroenie, 1985, 199 p.

11. **Ventcel E. S.** *Issledovanie operatsiy* (Investigation of Operations), Moscow, Nauka, 1988, 208 p.

12. **Gulaj A. V., Zajcev V. M.** *Intellektual'nye mehatronnye sistemy s distantsionnoy organizatsiej tranzaktsij: osobennosti postroeniya* (Intellectual mechatronic systems with remote organization of transactions: design features), *Doklady BGUIR*, 2015, no. 7, pp. 92—98.

13. **Troptshenko A. J., Troptshenko A. A.** *Cifrovaya obrabotka signalov. Metody predvaritel'noy obrabotki* (Digital procession of signals. Preliminary processing methods), SPb., Publishing house of GUITMO, 2009, 100 p.

14. **Tannenbaum E.** *Sovremennyye operatsionnyye sistemy* (Modern operating systems), SPb., Piter, 2002, 1041 p.

15. **Sajler G.** *Operatsionnaya sistema VxWorks i Wind River Linux: podhody k realizatsii real'nogo vremeni* (Wind River Linux and VxWorks real-time capabilities: a comparison), *Sovremennyye Tekhnologii Avtomatizatsii*, 2011, no. 3, pp. 14—18.

16. **Operatsionnaya sistema Nucleus-PC Week/RE** (Operational systems Nucleus-PC Week/RE), available at: www.pcweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=47517.