

УДК 681.324

Базовый модуль, управляющий установкой для выращивания монокристаллов кремния*

В.Е. Зюбин, В.Н. Котов, Н.В. Котов, А.В. Курочкин, А.А. Лубков, С.А. Лылов,
С.В. Окунишников, А.Д. Петухов

Рассматривается реализация базового модуля цифрового управляющего комплекса установкой для выращивания монокристаллов кремния диаметром до 250 мм методом вытягивания из расплава. Излагаются основные принципы построения и инженерные решения, использованные при создании аппаратной части и программного обеспечения системы управления.

* Опубликовано в журнале «Датчики и системы», 2004 г., №12, С. 17-21

ВВЕДЕНИЕ

Процесс получения монокристаллов кремния методом выращивания из расплава чрезвычайно сложен для автоматизации: управление ведется по нескольким параметрам, конечный продукт должен удовлетворять нескольким критериям, а сам процесс характеризуется сильной изменчивостью законов регулирования. Несмотря на то, что подобные процессы широко известны в химии, металлургии, кристаллографии, при получении сверхчистых, высокосоввершенных и редких материалов, биосинтезе, удовлетворительного решения проблемы так и не найдено.

Нестабильность процесса, отсутствие математических описаний, пригодных для использования в системе управления, приводят к необходимости экспериментальных работ по выявлению взаимозависимости параметров и созданию управляющих алгоритмов. Расходы на эксперимент становятся неотъемлемой и существенной частью затрат при эксплуатации.

Объемы экспериментальных работ при получении управляющих алгоритмов - *технологических программ* (ТП) выращивания существенно возрастают при попытках получить продукцию в предельных условиях, где течение процесса является крайне капризным, нестационарным и связано с ужесточением требований к комплексу технических средств по надежности и погрешности регулирования.

Зарубежные производители, занимающиеся выращиванием монокристаллического кремния, как правило, имеют более чем пятидесятилетний опыт работы, собственный штат высококлассных специалистов. Исследование и создание новых ТП производится преимущественно эволюционными методами. Технологии имеют характер «ноу-хау» и тщательно охраняются.

При этих обстоятельствах все попытки стороннего игрока повторить путь компаний-обладателей «ноу-хау» и выйти на рынок «классическим» эволюционным методом обречены на провал: продукция с низкими потребительскими характеристиками, - а это неизбежно на начальных этапах, - не будет иметь спроса, и в течение десятилетий предприятие будет вынуждено работать вхолостую. Поэтому вопрос быстрого и дешевого получения конкурентоспособных изделий является ключевым. Из легальных решений остаются только поиск выверенной методики создания ТП и совмещение экспериментальных работ со штатной эксплуатацией [1].

Созданная ранее система управления [2] хотя и была достаточно громоздкой, занимала три шкафа; тем не менее, удовлетворяла предъявляемым требованиям по стоимости и эргономичности. Она была реализована в виде распределенной многопроцессорной системы, в которой для большинства интеллектуальных узлов было использовано унифицированное решение на базе микроконтроллера Intel 196, программная часть строилась на базе событийно-управляемой архитектуры, обеспечивающей высокую степень независимости программных

компонентов и модифицируемость. Однако, в силу того, что разработка всех аппаратных узлов системы производилась самостоятельно, трудоемкость тиражирования и сопровождение системы оказалось экономически неэффективным для небольших партий, востребованных на рынке. Положение усугублялось продолжающимся переходом на импортную элементную базу и снятием с производства значительной части используемых в аппаратуре электронных компонентов. Кроме этого старая конструкция ростовой установки значительно модернизировалась: она была оснащена дополнительными датчиками и исполнительными устройствами, что предполагало существенное изменение алгоритма управления. Поэтому было решено, кроме коррекции программного обеспечения системы управления создать компактный вариант аппаратуры, максимально используя метод системной интеграции.

В статье излагается подход, который позволяет минимизировать временные и финансовые затраты при создании и сопровождении системы управления для выращивания монокристаллического кремния. Результаты работы должны быть интересны специалистам, занимающимся автоматизацией сложных технологических процессов на базе типовых аппаратных решений.

СПЕЦИФИКА ЗАДАЧИ

При автоматизации сложных объектов к системе управления предъявляется комплекс жестких требований, включающий требования по помехозащищенности, надежности, технологичности, времени восстановления, эргономичности, стоимости и т.д.

Установка для выращивания монокристаллов кремния (УВМК) методом вытягивания из расплава (метод Чохральского [3]) как объект управления имеет следующий ряд основных специфических особенностей:

- Эксплуатация в тяжелых условиях цеха промышленного предприятия, запыленность, наличие влаги обуславливает необходимость защищать аппаратуру системы управления.
- Расплавленный кремний является чрезвычайно агрессивной средой, выход процесса из-под контроля может привести к значительным материальным потерям и даже человеческим жертвам, поэтому к системе управления предъявляются повышенные требования по надежности и устойчивости, команды управления, подаваемые оператором, должны контролироваться на корректность.
- Относительно большое число разнородных цифровых и аналоговых сигналов, многопараметричность технологического процесса подразумевают сложный алгоритм, характеризующийся сильной степенью распараллеливания потока управления. Требуемую степень параллелизма невозможно обеспечить средствами операционных систем.
- Штатная эксплуатация имеет большую экспериментальную составляющую, тем более это касается этапа отработки системы управления, поэтому к программному обеспечению предъявляются повышенные требования по гибкости и модифицируемости; также требуется регистрировать большие объемы информации для последующего анализа.
- Низкий уровень компьютерной подготовки обслуживающего персонала предполагает простой, дружелюбный и эффективный пользовательский интерфейс на основе современных мультимедийных средств.
- Система управления УВМК должна обеспечивать возможность работы как в основных рабочих режимах (автоматический режим, ручной режим), так и во вспомогательных режимах (режим комплексных регламентных проверок, режим тарировки и т.д.). В автоматическом режиме система управления УВМК должна проводить выращивание монокристалла кремния по технологической программе, создаваемой инженером-технологом.
- Система управления УВМК должна быть выполнена в виде базового управляющего модуля (БУМ УВМК), допускающего подключение дополнительных устройств (датчики, приводы, источники питания) через последовательный канал типа RS232/485. Кроме этого БУМ УВМК должен предусматривать возможность интеграции в производственную систему цехового уровня посредством сети Ethernet, протокола TCP/IP.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

УВМК предназначена для получения монокристаллов кремния диаметром до 250 мм и состоит из ростовой камеры, газовакуумной системы, термосистемы, системы охлаждения. Структурная схема установки показана на рис.1. Ростовая камера имеет высоту около 3 м и диаметр около 1,5 м. Газовакуумная система состоит из четырех вакуумных насосов, линии подачи аргона и большого числа клапанов, положение которых определяет протекание процесса вакуумирования. Внутри камеры расположен нагреватель, который обеспечивает температуру до 1700 °С. Электропитание нагревателя может производиться от источника мощностью 180 кВт, который совместно с нагревателем образует термосистему. В стенках ростовой камеры проложены магистрали для прохождения охлаждающей жидкости (система охлаждения). УВМК содержит несколько десятков разнородных аналоговых сигналов, как входных, так и выходных, и около сотни входных и выходных цифровых сигналов. Каждая УВМК имеет отличительные особенности, описываемые более чем 300 настроечными значениями.

Параметры технологического процесса должны регулироваться с основной погрешностью не более 1 %.

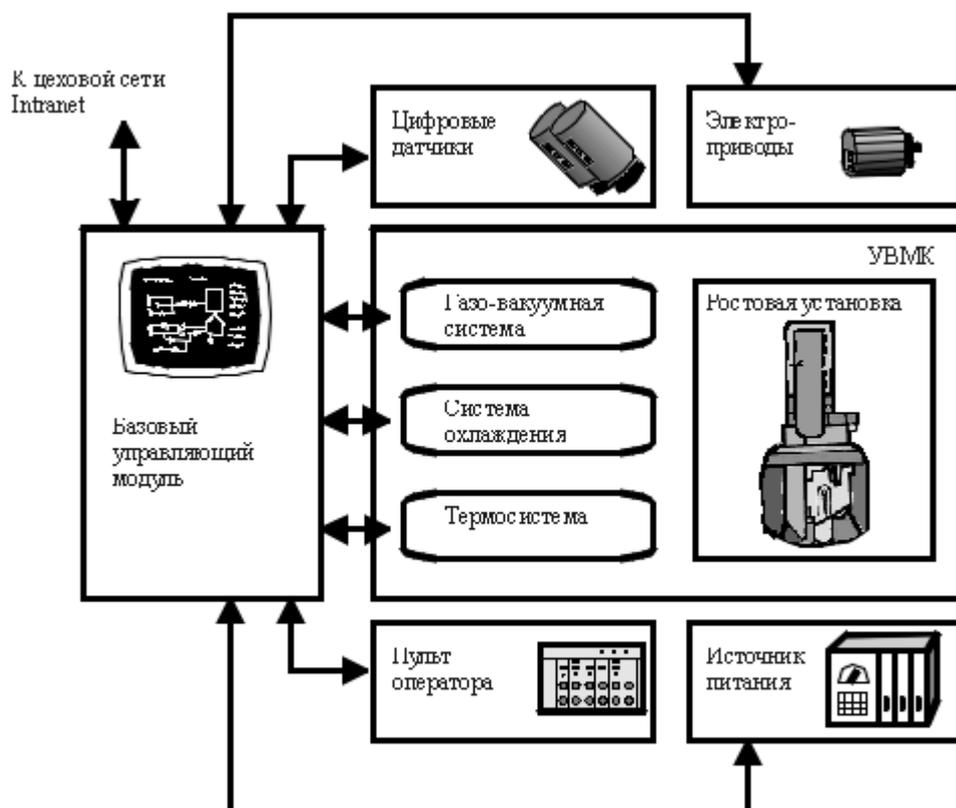


Рис. 1. Структурная схема установки и системы управления.

ТРЕБОВАНИЯ К БУМ УВМК

Для обеспечения работоспособности УВМК аппаратура и программное обеспечение (ПО) БУМ УВМК должны удовлетворять следующим требованиям:

- высокая надежность и устойчивость ПО, контроль возникновения аварийных ситуаций во время работы и предотвращение действий оператора, ведущих к аварийным ситуациям;
- визуальное отображение состояния установки на видеомониторе, в частности, процесса роста от видеокamеры телевизионного датчика;

- в) постоянный контроль отказов оборудования и выдача четких диагностических сообщений в случае неисправности;
- г) дружественный интерфейс с оператором;
- д) документирование текущих параметров с возможностью их считывания извне для последующего анализа и обработки специализированным ПО;
- е) удаленный мониторинг технологического процесса;
- ж) реализация алгоритма управления с большим числом параллельно исполняемых процессов;
- з) высокая степень гибкости и модифицируемости алгоритма управления;
- и) пыле- и влагозащищенность оборудования, невозможность использования при штатной работе клавиатуры персонального компьютера и манипулятора типа мышь;
- к) высокая степень модульности и возможность модификаций/модернизации как во время отладки, так и на протяжении всего жизненного цикла.

В результате анализа вариантов, предлагаемых на рынке, ограничений на стоимость и жестких требований к БУМ УВМК было решено использовать популярные платформы на базе высокопроизводительных процессоров Intel x86 серии в промышленном исполнении.

АППАРАТУРА БУМ УВМК

БУМ УВМК реализован на базе распределенной многомашинной архитектуры и конструктивно выполнен в виде герметичного шкафа, на передней панели которого расположен сенсорный экран, а на боковой - блок разъемов для подключения выносных устройств и аналого-цифровых сигналов с УВМК. На переднюю панель шкафа также выведена аварийная кнопка, выключатель питания и звуковой динамик. К блоку разъемов по последовательному каналу подключаются приводы, выносной пульт оператора, датчики и источник питания. БУМ УВМК оснащен бесперебойным источником питания, обеспечивающим сохранение функционирования системы при кратковременных сбоях питания.

Приводы обеспечивают перемещение и вращение затравкодержателя и тигля.

С помощью датчиков производятся бесконтактные измерения геометрии выращиваемого кристалла, температуры нагревателя, а также температуры и уровня расплава.

Выносной пульт оператора используется, как альтернативное устройство ввода команд и заданий в основные контуры регулирования в ручном режиме с визуальным контролем оператором процессов в ростовой камере через имеющиеся по ее периметру иллюминаторы.

Шкаф БУМ УВМК содержит:

- Крейт контроллера программного управления (КПУ), выполненный в стандарте MicroPC и реализующий функции управляющей ЭВМ. КПУ обеспечивает исполнение алгоритма работы, контроль, регулирование, измерение. Модульная архитектура крейта обеспечивает модифицируемость аппаратуры и гибкую настройку на условия конкретного применения.
- Панельный компьютер оператора (ПКО) типа IBM PC/AT с сенсорным экраном, имеющий достаточное качество графического изображения и большую емкость дисковой памяти. ПКО обеспечивает ввод команд оператора и отображение информации, поступающей от КПУ. Для этого типа компьютеров имеется большой спектр программного обеспечения, в том числе и кросс-средств. Сенсорный экран ПКО с одной стороны позволяет не использовать клавиатуру и манипулятор типа «мышь», которые трудно защитить от воздействий внешней среды, а с другой стороны обеспечивает простое взаимодействие оператора с системой управления.

В качестве базового элемента КПУ была выбрана плата процессора CPU686E фирмы Fastwel [4]. Процессор имеет высокую производительность и надежность. Файловая система расположена на виртуальном дисковом накопителе, который выполнен на флэш-памяти. На плате имеются встроенные последовательные каналы типа RS-232 и порт Ethernet.

Крейт КПУ содержит: дополнительный модуль последовательных интерфейсов 5554/5558 фирмы Octagon Systems [5] с четырьмя последовательными каналами типа RS 232/485, два модуля расширения входов/выходов UNIO96-5 фирмы Fastwel [6], позволяющие подсоединять к КПУ до 192 аналого-цифровых каналов (рис. 2). Крейт КПУ обладает следующими характеристиками:

- тактовая частота 300 МГц;
- флэш-память 8 Мбайтов;
- оперативная память 32 Мбайта;
- системная магистраль PC/XT;
- шесть последовательных каналов типа RS-232;
- скоростной канал 10/100 Base-T Ethernet;
- возможность подключения до 192-х гальванически развязанных аналого-цифровых сигналов.



Рис. 2. Структурная схема крейта КПУ.

Применение флэш-памяти для хранения кода программ КПУ обеспечивает возможность оперативной модификации программного обеспечения во время отладки, поскольку программирование микросхем производится без их извлечения из процессорного модуля, через выделенный последовательный канал RS-232 со штатного ПКО. Еще один последовательный канал RS-232 обеспечивает связь прикладных программ КПУ и ПКО. Разработанный протокол обмена данными по последовательному каналу предусматривает проверку контрольной суммы и повторную передачу пакетов в случае сбоев. Предложенная двухканальная схема позволяет производить независимый мониторинг исполнения программ во время штатной работы. Это решение явилось одним из ключевых для данного проекта, поскольку отлаживать программное обеспечение традиционными методами было бы затруднительно ввиду его объема и сложности.

Остальные четыре последовательных канала КПУ позволяют интегрировать в единую систему управления удаленные активные элементы - выносной пульт оператора, датчики геометрии кристалла, источник питания, приводы, а при необходимости и другие устройства. При этом устройства объединяются в локальную сеть типа "Общая шина с маркерным доступом", где КПУ выполняет функцию арбитра. Протокол обмена данными по сети обеспечивает помехоустойчивость за счет контроля целостности пакетов данных при помощи контрольной суммы и повторной передачи пакетов при сбоях.

Два модуля входов/выходов UNIO96-5 с модулями 73L фирмы Grayhill [7] обеспечивают ввод и гальваническую развязку дискретных и аналоговых сигналов с УВМК. Разрядность аналоговых сигналов – 12, приведенная погрешность АЦ/ЦА преобразований - 0,3%. Максимальное время преобразований - 18 мс.

ПКО в системе управления используется для организации графического диалога с оператором и документирования. Критические события в системе дублируются звуковыми сообщениями. Есть возможность просмотра на экране полноценного изображения роста кремния, которое поступает от соответствующей видеокамеры. При штатной работе команды, вводимые оператором через сенсорный экран, поступают в ПКО, затем по последовательному каналу передаются в КПУ, где обрабатываются и выполняются управляющей программой. Вся информация о действиях оператора, событиях в системе и изменении состояния объекта управления сохраняется в ПКО в виде файлов. Дополнительно ПКО обеспечивает сохранение и восстановление при перезапусках системы информации о положении исполнительных органов установки и настроечных параметрах системы, что позволяет в случае нерегламентированного прекращения работы, например, сбоя питания, не терять тарифовочную информацию, получение которой занимает по времени несколько часов. В режиме отладки ПКО используется как инструментальная машина для хранения исходных текстов программ, получения исполняемых файлов, загрузки исполняемых файлов в КПУ и отображения отладочной информации. Имеется возможность подключения ПКО к локальной вычислительной сети цеха и дистанционный контроль нескольких УВМК одним оператором.

Таким образом, вычислительная часть системы управления представляет собой гибкий многомашинный комплекс, который в совокупности с программным обеспечением позволяет удовлетворить жестким требованиям, предъявляемым объектом управления.

ПО СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

ПО системы управления состоит из ПО ПКО и ПО КПУ. Разделение не критической для технологического процесса функции интерфейса с оператором и собственно управление УВМК позволило строить ПО ПКО на базе т.н. Wintel архитектуры.

ПО оператора обеспечивает: начальную инициализацию системы; прием информации от КПУ по последовательному каналу RS-232; ведение протокола событий в системе и архивирование параметров технологического процесса; вывод информации на экран видеомонитора в виде цифровых полей, элементов мнемосхемы, графиков, текстовых и голосовых сообщений; ввод команд оператора и их передачу в КПУ для последующего исполнения; отработку алгоритмов, созданных технологом и определяющих ход процесса

выращивания кристалла; предоставление информации на персональный компьютер технолога (ПКТ) для удаленного мониторинга и последующего анализа; прием и передачу на ПКТ файлов с конфигурационной информацией и ТП.

При выборе средства разработки для ПО ПКО анализ имеющихся на рынке т.н. SCADA-пакетов и ОРС-компонентов показал, что ни один из них не удовлетворяет требованиям к функциональным возможностям. Проблемы вызывает работа с сенсорным экраном, организация голосовых сообщений, создание журнала событий и архива для периодического технологического процесса и т.д. Несмотря на достаточно удобные средства создания стандартных элементов управления (кнопок, полей ввода, мнемосхем) затраты на доработку таких систем оказались бы соизмеримы с созданием уникальной специализированной системы, что при учете стоимости покупных инструментов делало их использование экономически неэффективным. В результате выбор был сделан в пользу самостоятельной разработки.

ПО оператора построено по модульному принципу. В его состав входит программа взаимодействия с оператором (ПВО) и одиннадцать компонентов обработки информации: ведения базы данных параметров, ведения списка текущих сообщений, ведения журнала событий, архивирования данных, программной диагностики, отработки ТП, связи с КПУ, накопления команд к контроллеру, обработки сообщений от КПУ, общесистемной таблицы интерфейсов и обмена информацией с ПКТ.

ПВО обеспечивает операторский контроль технологического процесса. В задачи программы входит: визуализация параметров плавки, уведомление оператора о возникновении нештатных ситуациях, предоставление интерактивных средств управления установкой, конфигурирование датчиков и регуляторов системы, координация совместной работы всех программных модулей.

ПО ПКО написано на объектно-ориентированном языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio [8] и рассчитано на работу в операционной системе Microsoft Windows. Модули обработки информации созданы на базе модели компонентных объектов COM/DCOM от Microsoft. ПВО представляет собой диалоговое приложение, разработанное с использованием библиотеки классов Microsoft Foundation Classes (MFC).

ПО КПУ включает системно-независимую управляющую программу и вспомогательные системные средства (ВСС). ВСС исполняются под операционной системой MS DOS 6.22. Во время начальной настройки системы ВСС обеспечивают прием кодов управляющей программы по последовательному каналу RS-232 от ПО ПКО и запись их на флэш-диск. Во время штатной работы, по включению питания – ВСС загружают код управляющей программы с флэш-диска в ОЗУ и запускают управляющую программу на исполнение. Во время работы управляющей программы ВСС и функции операционной системы не используются. Системно-независимая управляющая программа реализует алгоритм работы установкой.

Управляющая программа выполняет следующие основные функции:

- инициализацию и тестирование системы;
- сбор информации о положении исполнительных органов УВМК и ее последующую передачу в ПВО для отображения;
- регулирование параметров;
- исполнение режимов работы установки;
- исполнение команд оператора, поступающих от ПВО;
- контроль возникновения аварийных ситуаций.

В процессе выбора программного обеспечения для управляющей программы ядра системы было установлено, что средства операционных систем не позволяют обеспечить требуемого уровня параллелизма и надежности системы. Специализированные языки стандарта МЭК 61131.3 [9], достаточно широко распространенные на рынке, также не отвечают предъявляемым требованиям, главным образом из-за существенных ограничений на сложность описываемого алгоритма [10]. Поэтому в качестве базового средства программирования был выбран уже хорошо зарекомендовавший себя на практике язык Reflex, созданный в рамках развития языка СПАРМ [11]. Язык обладает повышенными надежностными характеристиками [12], является

проблемно-ориентированным расширением языка Си, русскоязычен, предоставляет пользователю уникальную возможность структурно описать алгоритм работы сложных систем управления в виде множества параллельных слабо связанных процессов. Транслятор языка позволяет создавать системно независимый исполняемый код с высоким уровнем переносимости.

При создании управляющей программы использовался тот факт, что алгоритм работы любого сложного устройства можно разделить на некоторое множество более простых, независимых или слабо зависимых между собой процессов – целевых функций.

В результате такого разбиения алгоритм работы УВМК был представлен в виде множества из 691 процесса, организованных в гибкую, иерархическую структуру.

По функциональному признаку эти процессы можно разбить на пять категорий: 1) снятие данных, 2) регулирование параметров 3) реализация алгоритма работы, 4) контроль возникновения аварийных ситуаций, обнаружение и исправление ошибок, 5) системный мониторинг.

Управляющая программа при запуске перехватывает системные прерывания и контролирует возникновение нештатных ситуаций типа деления на ноль. В случае возникновения таких ситуаций выдается соответствующая диагностика. При этом в отличие от общепринятой практики останова алгоритма управления не происходит и общее функционирование системы сохраняется. Такой подход позволяет обеспечить повышенную устойчивость (robustness) алгоритма.

Параллельно созданию описания алгоритма работы УВМК была проведена адаптация Reflex на процессор новой архитектуры. Параллельно был откорректирован синтаксис языка, результатом чего явилось создание окончательного базового синтаксиса языка Reflex.

Системная независимость исполняемого кода позволила использовать дешевую операционную систему MS DOS 6.22.

Эффективная организация параллельного исполнения позволила добиться высокой вычислительной мощности и малого времени реакции на внешнее событие: 691 процесс обеспечивают время реакции на ключевые события, не превышающее 100 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные методологические и инженерные решения, примененные при создании автоматизированной системы управления сложным промышленным объектом. В работе были использованы: унифицированная основа на базе популярной архитектуры и современные методы создания программного обеспечения. За счет этого была обеспечена умеренная стоимость тиражирования и снижение затрат на сопровождение. Разнесение некритических (с точки зрения надежности) функций графического интерфейса оператора и особо ответственных функций управления объектом по разным вычислительным платформам позволило, с одной стороны, использовать широко развитые средства мультимедиа на базе Wintel, а, с другой стороны, обеспечить надежностные характеристики системы. Созданная архитектура обеспечивает возможность интеграции БУМ УВМК в цеховую производственную систему и простой способ подключения дополнительных внешних устройств.

Испытания у заказчика доказали высокую надежность и эффективность созданной системы управления при умеренной стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зюбин В.Е. Создание управляющих алгоритмов для сложных технологических процессов // Автоматизация и современные технологии, 2004, №8
2. Булавский Д.В., Зюбин В.Е., Карлсон Н.Н., Криворучко В.О., Миронов В.В. Автоматизированная система управления установкой для выращивания монокристаллов кремния // Автометрия, 1996, №2.
3. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974.
4. CPU686E. Модуль процессора. Руководство пользователя. Fastwel Inc., 1999.

5. 5554/5558. Руководство пользователя. Индекс документа #03580. Octagon Systems Corporation, 1998.
6. UNIOxx-5. Программируемые модули ввода-вывода. Руководство пользователя. Fastwel Inc., 1999.
7. OpenLine® I/O Series. 70L & 73L. User's Manual. Grayhill Inc., 1999.
8. Visual C++ 5.0. Руководство разработчика. : Пер. с англ. / Д.Бенет, С.Макконин, В.В. Мейфилд и др. - СПб: Диалектика, 1998.
9. IEC 65B/373/CD, Committee Draft - IEC 61131-3. Programmable controllers. Part 3: Programming languages, 2nd Ed. // International Electrotechnic Commission. 1998
10. Зюбин В.Е. К пятилетию стандарта IEC 1131-3. Итоги и прогнозы. // Приборы и системы управления. 1999. № 1.
11. Зюбин В.Е. Язык СПАРМ - средство программирования микроконтроллеров // Автометрия. 1996. № 2.
12. Зюбин В.Е. Исследование условий применимости языка параллельного программирования СПАРМ для задач построения надежных управляющих программ // Распределенная обработка информации: Тр./Шестой международный семинар. - Новосибирск. 1998 .

30 апреля 2004

Сведения об авторах:

Владимир Евгеньевич Зюбин – канд. техн. наук, ст. научн. Сотрудник

Виктор Николаевич Котов – вед. инж. ИАиЭ СО РАН

Николай Викторович Котов – научн. сотрудник ИАиЭ СО РАН

Александр Валерьевич Курочкин – научн. сотрудник ИАиЭ СО РАН

Анатолий Александрович Лубков – канд. техн. наук, зав. лаб. ИАиЭ

Сергей Анатольевич Лылов – инж. ИАиЭ СО РАН

Сергей Валерьевич Окунишников – инж. ИАиЭ СО РАН

Александр Дмитриевич Петухов – вед. инж. ИАиЭ СО РАН

Т.р. (383) 330-71-62, (383) 333-23-87