

АРХИТЕКТУРА ТЕЛЕМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УДАЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

М.Ю. Гук, В. С. ЗАБОРОВСКИЙ

Аннотация

Обсуждаются различные аспекты разработки архитектуры аппаратно-программных компонент телематических виртуальных приборов. Предлагаемый подход учитывает требования к приборам, используемым при проведении активных экспериментов с распределенными многомерными объектами.

Various aspects of architecture and hardware-software components development are discussed. Offered telematics approach is considered with respect to creation of virtual measuring devices in accordance with requirements on their use in distributed multidimensional objects.

Введение

Возрастающая сложность современных технических систем, которые часто принимают форму распределенных объектов, функционирующих в сетевой среде компьютерных телекоммуникаций, делает актуальным разработку специализированных средств измерения и контроля. Такие средства должны обладать развитыми возможностями формирования широкого спектра тестовых воздействий, цифровой обработки информации и адаптации своих характеристик к конкретным условиям проведения экспериментов. Перечисленные выше требования определяют специальный класс технических устройств, которые получили название виртуальных приборов (ВП) [1] и в настоящее время широко используются для решения различных задач автоматизации и управления. Новые возможности по повышению точности идентификации характеристик

объекта открываются при организации активных экспериментов, основанных на формировании многомерных (векторных) воздействий и синхронной регистрации соответствующего им отклика. Многомерность рассматривается как многоканальность систем ввода-вывода информации и многопараметричность сигнала, передаваемого по одному каналу.

Техническая реализации отмеченных выше особенностей проведения активных экспериментов применительно к распределенным объектам требует создания ВП, в которых процессы получения и обработки информации распределяются между программно-аппаратными средствами компьютера и блоков ввода-вывода. Ниже рассматриваются новый тип ВП, использующий телематические устройства ввода-вывода с программируемой структурой связей аппаратных и программных компонент, используемых для выполнения функций генерации и измерения сигналов в режиме удаленного доступа к объектам исследования. В работе предлагается решение задачи синхронизации процессов фиксации и обработки данных, основанное на управлении межканальной согласованностью процессов генерации воздействий и измерения соответствующих откликов объекта исследования. Предлагаемый подход к синтезу архитектуры ВП позволяет обеспечить высокую точность синхронизации при подключении телематического устройств ввода-вывода информации и процессора обработки к одной локальной компьютерной сети или при организации межсетевого взаимодействия с использованием сети Интернет.

Анализ существующих подходов

Формально функционирование ВП можно описать с помощью многомерной модели «вход-выход», в которой входные и выходные сигналы представляются набором векторов X и Y , а связь между ними задается функциональным оператором $\Phi(X, Y)$. Компонентами вектора X

являются измеряемые сигналы объекта и управляющие воздействия оператора. Компонентами вектора Y являются сигналы воздействий, подаваемых на объект и результаты, представляемые оператору в различных формах. Функциональную сложность прибора можно охарактеризовать размерностью и параметрами оператора $\Phi(X, Y)$. Реактивность прибора можно определить как задержку реакции на входные воздействия. Критерием применимости прибора для решения той или иной задачи можно считать удовлетворение заданным требованиям функциональности при реактивности, отвечающей динамическим свойствам исследуемого объекта. При организации межсетевого взаимодействия с объектом возникают требования к межканальной синхронизации процессов измерения и обработки информации, которые могут быть основаны на следующих методах управления:

- подача команд запуска в строго определенные моменты времени, одновременно или с известными значениями задержек для выделенной группы каналов ввода-вывода данных;
- согласование таймеров блока ввода-вывода и обработки информации с помощью специальных протоколов или технических средств обмена данными.

В обоих случаях синхронизация таймеров используется для своевременного запуска процессов генерации и измерения сигналов путем формирования меток времени событий. Функциональность в традиционных приборах закладывается на этапе проектирования и не может быть изменена после его изготовления. Такие приборы могут иметь predetermined набор режимов функционирования, различающихся характеристиками элементов оператора $\Phi(X, Y)$.

Для организации сложных экспериментов, в том числе и с распределенными объектами, эффективно применение ВП, в которых блоки, выполняющие функции преобразования сигналов связаны с

процессорами обработки с помощью сетевых протоколов, а элементы оператора $\Phi(X, Y)$ являются алгоритмически реконфигурируемыми. Номенклатура применяемых модулей определяется набором каналов взаимодействия с объектом, использующихся для подачи воздействий и снятия отклика. Виртуальность прибора означает, что органы управления и индикации прибора являются графическими образами на экране компьютера, а управление прибором осуществляется стандартными устройствами ввода: клавиатура, мышь, сенсорный экран. Изменение функциональности (в пределах возможностей имеющихся средств ввода-вывода и вычислительно-коммуникационных ресурсов компьютера), равно как и формирование вида виртуальной «лицевой панели» осуществляется программно, без модификации состава аппаратных модулей. Это свойство технологии ВП особенно ценно для создания уникальных измерительных комплексов, когда проведение цикла разработки и производства «железного» прибора неприемлемо по экономическим причинам (высокая стоимость и значительное время цикла).

Аппаратной платформой ВП стандартной архитектуры является персональный компьютер (ПК) с центральным процессором (ЦП), в котором реализуются алгоритмы обработки, и устройства связи с объектом (УСО), устанавливаемые в слоты расширения системной шины ПК. Выбор такой архитектуры ВП объясняется широкой доступностью и открытостью спецификаций интерфейсов подключения к шинам ISA, PCI или PCI-E [2, 3] и наличием развитых инструментальных средств для создания прикладного программного обеспечения (ПО). Для классической архитектуры ВП характерно, что устройства связи с объектом являются абонентами системной шины ПК и обладают следующими свойствами:

- для регистров и областей памяти УСО выделены области в пространстве физических адресов компьютера;

- программные обращения к УСО выполняются непосредственно инструкциями центрального процессора;
- физическая передача данных между процессором и УСО происходит во время выполнения соответствующей инструкции ЦП и занимает время $10^{-7} \dots 10^{-6}$ с при передаче байта или слова.
- УСО может быть мастером шины, что означает возможность его высокопроизводительного обмена с памятью ПК без участия ЦП.
- УСО может быть источником аппаратных прерываний ЦП, возбуждаемых по определенным событиям.

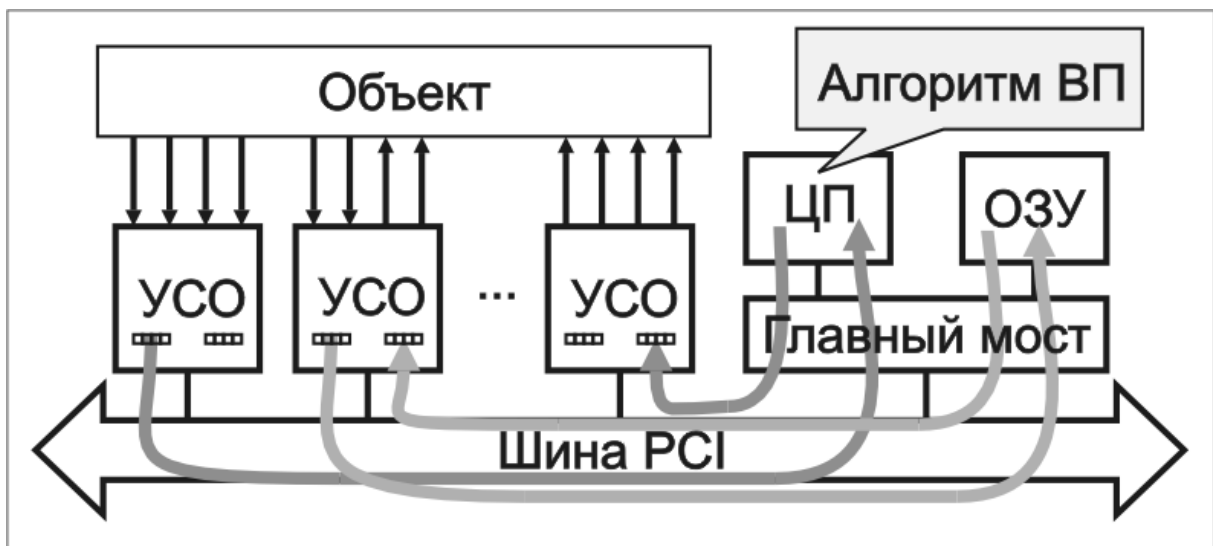


Рис. 1. Стандартная архитектура ВП

Структурная схема ВП классической архитектуры приведена на рис. 1. На рисунке изображена реализация функциональной связи Φ_{ij} в классическом ВП: сигнал со входа X_i проходит через свой первичный преобразователь до регистра (ячейки памяти), где он становится программно-доступным. Программный модуль, отвечающий за данную связь, должен выполнить процедуру ввода данных, затем выполнить обработку, предписанную элементом Φ_{ij} , и после этого осуществить процедуру вывода в преобразователь Y_j . Каждый из этих шагов вносит свой вклад в задержку реакции. При оценке достижимой функциональности и реактивности ВП, реализуемой на данной

архитектуре, следует учитывать производительность ЦП, модулей ввода-вывода и шины [2, 3, 4]. Отметим, что программные модули для элементов оператора $\Phi(x, y)$ исполняются последовательно.

Применение блоков УСО, устанавливаемых в слоты шины расширения компьютера, обеспечивает минимальные задержки доставки информации между интерфейсными преобразователями и функциональными программными модулями. Благодаря этому чисто программными способами достижима межканальная синхронизация с разрешением порядка $10^{-7} \dots 10^{-6}$ с (время между транзакциями на шине PCI). Для более точной синхронизации требуются специальные средства, обеспечивающие межканальные связи на аппаратном уровне. Такие связи конструктивно несложно обеспечить внутри одного модуля (платы); межмодульные связи можно обеспечить применением модулей стандарта PXI. Конструктив PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) специально разработан для инструментальных систем; он представляет собой шасси для объединения модулей ввода-вывода с интерфейсом cPCI (Compact PCI) или PXI. Шасси обеспечивает связь модулей по шине PCI, прецизионную (выровненную по задержкам с точностью до 1 нс) разводку тактового сигнала (10 МГц) и специальные межмодульные связи. Применение PXI является мощным, но дорогостоящим решением для построения многоканальных ВП с высокой точностью синхронизации.

Для стандартной архитектуры характерно, что ВП является сугубо локальным устройством: удаление УСО от процессора обработки сигналов ограничено характеристиками локальной шины ПК. Протяженность параллельной шины PCI не превышает десятков сантиметров; применение PCI Express позволяет увеличить протяженность локальной шины до 20 м, а при оптоволоконном интерфейсе до 200 м, но это чрезвычайно дорогостоящее решение. В ряде случаев возникает задача построения ВП, у которых УСО по отношению к управляющему ПК должно быть внешним

устройством с существенным удалением от управляющего ПК. Ряд производителей выпускают модули-приставки с функциями аналого-цифровых (АЦП), цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей, осциллографов, генераторов, измерителей различных параметров сигналов, подключаемых по интерфейсу USB. С их использованием аппаратной платформой построения ВП может стать любой ПК (в том числе блокнотный или планшетный) и набор внешних устройств, подключаемых через интерфейс USB. Однако платой за сравнительно низкую цену и относительно большое удаление УСО от ПК (до 30 м) являются проблемы, порожденные существенными (порядка миллисекунд) недетерминированными задержками доставки данных между интерфейсными преобразователями и модулями обработки ПК [4]. Эти задержки при организации многоканальных взаимодействий ограничивают точность синхронизации ввода и вывода (единицы мс), снижают достижимую реактивность и функциональность ВП.

Архитектура телематических виртуальных приборов

Анализ проблем создания высокопроизводительных многоканальных ВП с обеспечением межканальной синхронизации приводит к постановке задачи разработки новой аппаратно-программной архитектуры построения ВП на базе телематических устройств. Здесь аппаратным базисом должны стать УСО телематического типа, связанные с управляющим ПК сетями передачи данных. Телематические средства позволяют приблизить модули ввода-вывода непосредственно к объекту, что позволяет сократить число и длину разнородных соединительных кабелей, а также уменьшить помехи в сигнальных цепях. Телематические устройства могут располагаться на объекте в зонах, где размещение управляющего ПК затруднительно или невозможно. С использованием телематических устройств можно строить

распределенные системы и мультисенсорные сети, не связанные топологическими ограничениями, характерными для ВП.

К архитектуре телематических ВП предъявляется ряд требований:

- обеспечение подключения УСО к управляющему ПК сетевыми интерфейсами (Ethernet) с использованием протокола (TCP/IP);
- обеспечение точности межканальной синхронизации в субмикросекундном диапазоне;
- построение высокопроизводительных функционально сложных многоканальных ВП, малочувствительных к задержкам доставки;
- программируемость структуры связей между аппаратными и программными компонентами виртуального прибора;
- удобство программного взаимодействия с УСО.

Применение телематических УСО имеет свою специфику, которая отражается на идеологии построения ВП. Так, связь управляющей программы с телематическими модулями ввода-вывода осуществляется по интерфейсам с пакетной передачей, которые могут обладать высокой пропускной способностью, но всегда имеют значительную задержку доставки [5]. Функциональность стандартных ВП осуществляется при чередовании операций обращений к регистрам (областям памяти) модулей ввода-вывода и процедур программной обработки данных. Регистровая модель взаимодействия с модулями ввода-вывода, естественная для стандартных ВП на базе локальных шин, эффективна лишь при малых затратах времени на транзакции ввода-вывода. В этом случае достижима высокая реактивность виртуального прибора на входные воздействия: цикл «ввод-обработка-вывод» может укладываться в единицы микросекунд. При использовании телематических средств ввода-вывода из-за задержек доставки длительность подобного цикла имеет порядок единиц миллисекунд при связи через локальную сеть, а в сетях с маршрутизаторами – десятков-сотен миллисекунд. Очевидно, что для

достижения высокой реактивности ВП с телематическими средствами ввода-вывода требуются специальные архитектурные решения.

Структура ВП, удовлетворяющего поставленным требованиям, приведена на рис. 2. Центральным элементом телематического УСО является программируемое арифметико-логическое устройство (ПАЛУ), связывающее источники и приемники цифровых и логических сигналов, транспортный контроллер и дополнительную локальную память [6, 7]. Загрузкой конфигурации ПАЛУ обеспечивается изменение связей и алгоритмов, что позволяет в соответствии с идеологией ВП на унифицированных аппаратных средствах строить множество функционально различающихся приборов.

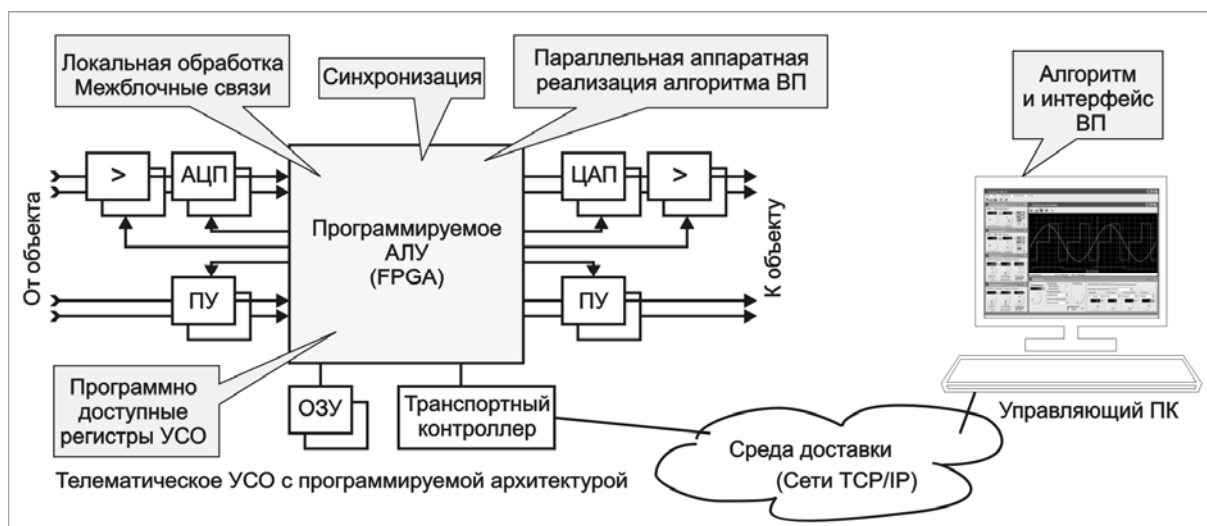


Рис. 2. Виртуальный прибор с телематическим УСО

На ПАЛУ возлагается ряд функций:

- выполнение интерфейсных функций УСО, обеспечивающих связь программы ВП с каналами взаимодействия с объектом;
- функциональные преобразования логических и цифровых сигналов (например, функции таймеров-счетчиков, фильтрация цифрового потока, сравнение, поиск максимумов и минимумов и т.п.);
- организация межканальных связей и синхронизации.

В данной архитектуре ВП аппаратные средства УСО выполняют функции, часть из которых в классическом ВП выполнялась аппаратными средствами модулей ввода-вывода, а другая — программными модулями, исполняемыми ЦП последовательно. Выполнение в ПАЛУ функций обработки данных позволяет радикально повышать производительность ВП за счет двух факторов: высокой скорости исполнения аппаратных алгоритмов и физической одновременности выполнения процессов на множестве каналов. Межканальная синхронизация достигается общим тактированием блоков.

Приведенная структура применена в устройстве ОСЦИГЕН [7], название которого происходит от его наиболее типичного применения — комбинации компьютерного осциллографа и генератора. Прибор содержит набор основных модулей связи с объектом:

- два широкополосных (30 МГц) канала аналогового ввода;
- два широкополосных (5 МГц) канала аналогового вывода;
- канал ввода дискретной информации с управляемым порогом срабатывания (вход внешней синхронизации).

Кроме того, имеются средства расширения ввода-вывода: последовательные интерфейсы (UART, SPI, I2C), битовый ввод-вывод произвольного назначения, 8-канальный АЦП и 2-канальный ЦАП. Основные каналы аналогового ввода и вывода кроме преобразователей (10 битных АЦП и ЦАП соответственно) содержат широкополосный нормирующий усилитель с управляемым смещением и коэффициентом усиления, служащий для расширения динамического диапазона генерируемых и регистрируемых сигналов. Благодаря этому осуществляется отображение интересующего диапазона напряжений на полную шкалу преобразований при возможности смещения нулевого уровня в широких пределах. Для входных каналов диапазон регистрации может составлять от 50 мВ до 100 В на всю шкалу АЦП, входной импеданс

соответствует стандартному входу осциллографа (1 Мом, 30 пф). Для выходных каналов полная шкала ЦАП может отображаться на диапазон напряжений от 100 мВ до 20 В, выходной сигнал может быть в пределах ± 10 В при токе до 10 мА, импеданс 50 Ом. Управление усилением и смещением осуществляется программными обращениями со стороны управляющего ПК – записью значений в регистры соответствующих блоков ПАЛУ; их аппаратная логика формирует интерфейсные сигналы, передающие данные в служебные ЦАПы (для смещения) и управляющие электронными аналоговыми коммутаторами.

Телематические возможности прибора обеспечиваются транспортным микроконтроллером с интерфейсом Ethernet 10/100 Мбит/с и поддержкой стека TCP/IP. Имеется возможность обнаружения и настройки адресов приборов в локальной сети; управляющий ПК может связываться с приборами через локальные и глобальные сети. Возможно подключение прибора к ПК и по интерфейсу USB (480 или 12 Мбит/с).

Ключевым элементом архитектуры прибора¹ является ПАЛУ на базе FPGA фирмы Altera, связывающее модули ввода-вывода, локальную память и транспортный контроллер. Его внутреннее содержимое определяет текущий набор функциональных блоков, подключаемых к шинам данных АЦП и ЦАП, а также дополнительным линиям дискретного ввода-вывода. Все модули тактируются общим сигналом с частотой 50 МГц, что обеспечивает разрешение по времени любых операций с дискретностью 20 нс. Модули могут собираться из логических ячеек, триггеров, счетчиков, компараторов, сумматоров и умножителей. Каждый функциональный блок имеет набор регистров, через которые осуществляется удаленное взаимодействие управляющего компьютера с прибором. Модули памяти связываются с модулями ввода-вывода, образуя

¹ Структура прибора защищена патентом RU 33237 U1

узлы автоматической регистрации и генерации сигналов. Связи могут быть комбинированными: в память регистрации могут одновременно поступать данные от АЦП (10 бит) и отдельные логические сигналы. Таким образом, функциональность регистратора может варьироваться от осциллографа смешанных сигналов (2 аналоговых канала и 12 логических) до 32-канального логического анализатора.

Набор блоков может быть расширен с учетом решаемых задач. Для конкретного применения прибора формируется свой файл конфигурирования FPGA, содержащий требуемый набор функциональных блоков. Файл автоматически загружается при подключении к прибору управляющего ПО, возможна и автозагрузка по включению питания.

Для построения ВП на базе прибора ОСЦИГЕН используется регистровая модель взаимодействия с его функциональными узлами. Для эффективного взаимодействия с прибором через телематические каналы связи разработан пакетный протокол прикладного уровня, обеспечивающий агрегирование единичных регистровых обращений в командный пакет. Применение командных пакетов позволяет «спрессовать» во времени пачку регистровых транзакций. Командные пакеты эффективны для управления прибором, когда требуется обращение к множеству регистров функциональных блоков. В протоколе имеются и блочные примитивы, оптимизированные для передачи массивов данных.

В платформу ОСЦИГЕН заложен набор средств обеспечения синхронизации многоканальных воздействий. Синхронность регистровых операций с разбросом в единицы микросекунд обеспечивается помещением их запросов в один командный пакет. Для достижения более высокой синхронности в приборе имеется общий регистр команд, в котором отдельные битовые поля управляют соответствующими модулями ввода-вывода виртуального прибора, достигая одновременности в пределах 20 наносекундного такта. Имеется также регистр отложенных

команд аналогичного назначения; команды из этого регистра выполняются по какому-либо внутреннему или внешнему сигналу. С помощью отложенных команд возможна аппаратная синхронизация нескольких приборов, образующих *кластер* телематических средств синхронного многоканального взаимодействия. Данные регистрации снабжаются метками времени с разрешением 20 нс.

Аппаратная платформа ОСЦИГЕН имеет многоуровневую программную поддержку на управляющем компьютере. Нижние уровни реализуют пакетный протокол взаимодействия независимо от используемого транспорта (TCP/IP или USB), обеспечивая необходимые функции обнаружения и конфигурирования устройств. Средний уровень реализует набор библиотечных функций взаимодействия с функциональными блоками: настройку усилителей и развертки осциллографа, управление генераторами, фильтрами и т.п. Верхний уровень — программа OGView — реализует функциональность и графический интерфейс виртуального прибора. Программа OGView — многооконное приложение для ОС Windows, построенная по модульному принципу. В ней имеется каркас, обеспечивающий среду для выполнения подключаемых модулей-плагинов. Каждый плагин отвечает за свой функциональный блок (каналы вертикального отклонения, развертка, экран осциллографа), или даже отдельный виртуальный прибор (генератор, частотомер). Применение технологии плагинов сокращает затраты времени на разработку специфических приложений прибора.

Заключение и направления дальнейших разработок

Предлагаемая архитектура аппаратно-программных средств позволяет реализовать основные преимущества технологии виртуальных приборов вне топологических и конструктивных ограничений, связанных с использованием стандартных реализаций. При этом достигаются высокие

показатели производительности измерений и генерации воздействий при высокой точности синхронизации многоканальных и многомерных взаимодействий с объектом.

Новизной предлагаемого решения является вынесение критических ко времени элементов алгоритмов виртуальных приборов из программы центрального процессора в аппаратные средства телематических устройств. Благодаря этому задержки доставки информации, свойственные телематическим сетям, не оказывают существенного влияния на производительность и динамические характеристики ВП. В отличие от приборов, которые используют заказные логические схемы, предлагаемое решение позволяет осуществлять динамическое реконфигурирование структуры УСО, что обеспечивает оперативную адаптацию их функциональности к широкому кругу задач измерения и контроля.

ВП ОСЦИГЕН, выполненный на основе описанной выше методики синтеза, успешно применяется для решения задач, требующих разнообразных схем измерений и управления параметрами при проведении активных экспериментов. Так на его базе создан технологический стенд для автоматизации настройки и испытаний клистронных усилителей, в котором ВП используется для управления генератором СВЧ и регистрации импульсов, выполняя синхронное детектирование сигналов. Приборы ОСЦИГЕН используются в качестве телематических средств измерения и управления в Центре коллективного пользования «Лазерные и оптические технологии» (<http://www.lot-spb.ru>), обеспечивая регистрацию серий быстропротекающих процессов. Приборами ОСЦИГЕН оснащена учебная лаборатория микроконтроллеров и ОСРВ [СПбГПУ](#); стенды на базе ОСЦИГЕН используются для проведения лабораторных работ по электротехнике и электронике в образовательных учреждениях Санкт-Петербурга [8].

Предложенная методология построения ВП допускает наращивание числа каналов взаимодействия с объектом и повышение функциональной сложности прибора путем повышения производительности телематических блоков УСО и применения кластеризации измерительно-вычислительных ресурсов. Это позволяет использовать телематические ВП при решении ~~сложных~~ задач автоматизации многомерных экспериментов, для настройки и управления сложными технологическими процессами.

Литература

1. Бутырин П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента. Компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций). — ДМК Пресс, 2005 г.
2. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия, 3-е изд. — СПб: Питер, 2006 г.
3. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. — СПб: Питер, 2002 г.
4. Гук М. Шины PCI, USB и FireWire. Энциклопедия. — СПб: Питер, 2005 г.
5. Гук М. Аппаратные средства локальных сетей. Энциклопедия. — СПб: Питер, 2000 г.
6. Заборовский В. С., Игнатъев Б. В., Гук М. Ю. Многофункциональный цифровой вычислительный прибор для измерения и генерации сигналов. Патент на полезную модель №41157.
7. Заборовский В. С., Игнатъев Б. В., Гук М. Ю. Быстродействующий цифровой вычислительный прибор для измерения и генерации сигналов. Патент на полезную модель №40805.
8. Головнева Т.А., Гук М. Ю., Кормина Н. Н., Рубец М. В. Электротехника и электроника: Лаб. практикум. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. 142 с.