

УДК 681.3.019 : 621.317.75

А. Ю. Булгаков, В. Н. Вьюхин, Ю. А. Попов,
Ю. Л. Тани, Ю. В. Шалагинов

(Новосибирск)

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ

Описывается измерительно-вычислительный комплекс, предназначенный для сбора и статистической обработки данных о случайных сигналах в полосе до 500 МГц с временным разрешением 100 пс и запоминания полученных данных объемом до 1 Гбит за один сеанс. Рассматриваются особенности применения международного стандарта VXI для построения этого комплекса. Излагается подход к программным средствам комплекса.

В настоящей работе излагаются особенности построения измерительно-вычислительного комплекса с высокими метрологическими и пользовательскими характеристиками на основе перспективного стандарта VXI.

Целесообразность применения стандарта VXI обусловлена тем, что распространенные компьютерные шины (VME, Multibus и другие) плохо приспособлены для создания сложных высокопроизводительных измерительных систем. Так, при разработке широкополосного измерительно-вычислительного комплекса (описанного в [1]) с использованием шины VME возникла необходимость применения дополнительных неунифицированных магистралей для межблочной передачи данных.

Стандарт VXI, являющийся расширением VME на измерения, был принят в 1987 году группой крупных мировых производителей измерительного оборудования. В настоящее время около 250 производителей выпускают более 800 наименований коммерческих продуктов в стандарте VXI, а по прогнозам фирмы "National Instruments" к 2000 году половина всего измерительного оборудования будет выпускаться в этом стандарте [2].

Однако в России этот стандарт еще не получил широкого распространения и не имеется достаточного опыта разработок (как аппаратных, так и программных) в нем. В связи с этим ниже приводятся необходимые для последующего изложения краткие сведения по стандарту VXI.

Стандарт VXI предполагает, что измерительный прибор любой сложности может быть выполнен в виде отдельного модуля, вставляемого в объединительный крейт. Определены четыре типоразмера модулей: A, B, C, D. Модули типа A и B есть модули VME одно- и двукратной высоты. Модули типа C, имеющие размер платы 233 × 340 мм и ширину передней панели 30 мм, наиболее часто используются для построения измерительных приборов. Дальнейшее описание относится к этому типу.

Состав магистрали VXI, приведенный на рис. 1, включает в себя несколько шин. Шина VME целиком включена в стандарт и предназначена для связи модулей с компьютером с форматом обмена до 32 шин адреса и 32 шин данных. Весьма важным является то, что магистраль также содержит локальную шину, которая выполнена в виде коротких отрезков, соединяющих соседние модули, и поэтому допускает передачу сигналов со скоростью до 100 Мбайт/с. По локальной шине допускается передача практически любых сигналов, разде-

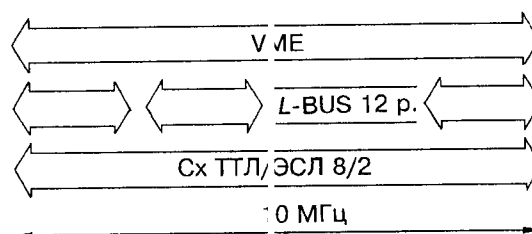


Рис. 1. Состав шин VXI/C

ленных на пять классов: ЭСЛ, ТТЛ и сигналы низкого, среднего и высокого уровней. Ширина локальной шины 12 линий. Восемь сквозных ТТЛ и две ЭСЛ-линии предназначены для передачи синхросигналов и данных по нескольким протоколам с частотой до 12 МГц. Все модули в крейте обеспечены единой синхронизацией 10 МГц, поступающей от нулевого гнезда крейта с разбросом задержек не более 8 нс. Нулевое гнездо крейта также имеет индивидуальные линии идентификации модулей.

Стандартом нормируются характеристики системы охлаждения крейта и модулей, а также параметры электромагнитной совместимости модулей. Шина питания на плате включает линии -2 и $-5,2$ В для питания ЭСЛ-схем.

Стандарт допускает четыре типа модулей: регистровые, на основе сообщений, памяти и дополнительные. Регистровые модули управляются двоичными командами как модули VME. Модули на основе сообщений управляются командами в ASCII-кодах по протоколу последовательной передачи слов и должны содержать интерпретатор команд. Модули памяти содержат дополнительный конфигурационный регистр, в котором указывается тип памяти и требуемое адресное пространство.

Получили распространение несколько вариантов управления однокрейтовыми VXI-системами (рис. 2).

1. Компьютер встроен в крейт и занимает обычно две левые позиции. Помимо вычислительных функций, он выполняет функции гнезда «0» и менеджера ресурсов. Специальная программа — менеджер ресурсов — осуществляет идентификацию модулей, тестирование, распределение адресного пространства памяти, установление иерархии модулей и инициализацию нормального запуска. Снаружи имеются гнезда для подключения монитора и клавиатуры и обычно порт IEEE-488. Широко используется для этих целей встроенный компьютер EPC-7 фирмы RADY-SYSTEM (рис. 2, а).

2. Компьютер связан с крейтом интерфейсом IEEE-488. Крейт в этом варианте выступает в роли абонента шины IEEE-488. В нулевой позиции крейта устанавливается командный модуль (например, HP E1406A), имеющий порт IEEE-488. Командный модуль обеспечивает ресурсы гнезда «0» крейта и может содержать интерпретатор, позволяющий управлять регистровыми модулями с помощью команд в ASCII-кодах (рис. 2, б).

3. Компьютер управляет крейтом по шине MXI. Эта мультисистемная кабельная шина обеспечивает скорость передачи до 20 Мбайт/с и допускает многокрейтовую конфигурацию. В компьютере размещается плата интерфейса ISA (EISA)-MXI (например, типа HP E1491), которая кабелем соединяется с расширителем шины VXI-MXI (типа HP E1492), установленным в крейте (рис. 2, в).

Существующее типовое программное обеспечение VXI систем на основе пакетов HP ITG2 (интерактивный тестовый генератор), Lab View, Lab Windows реализует концепцию виртуальных приборов. Это означает, что каждый измерительный модуль представляется пользователю на терминале в виде передней панели обычного прибора с привычными атрибутами: кнопками, ручками, табло, шкалами. Управление виртуальными приборами мало отличается от управления обычными приборами.

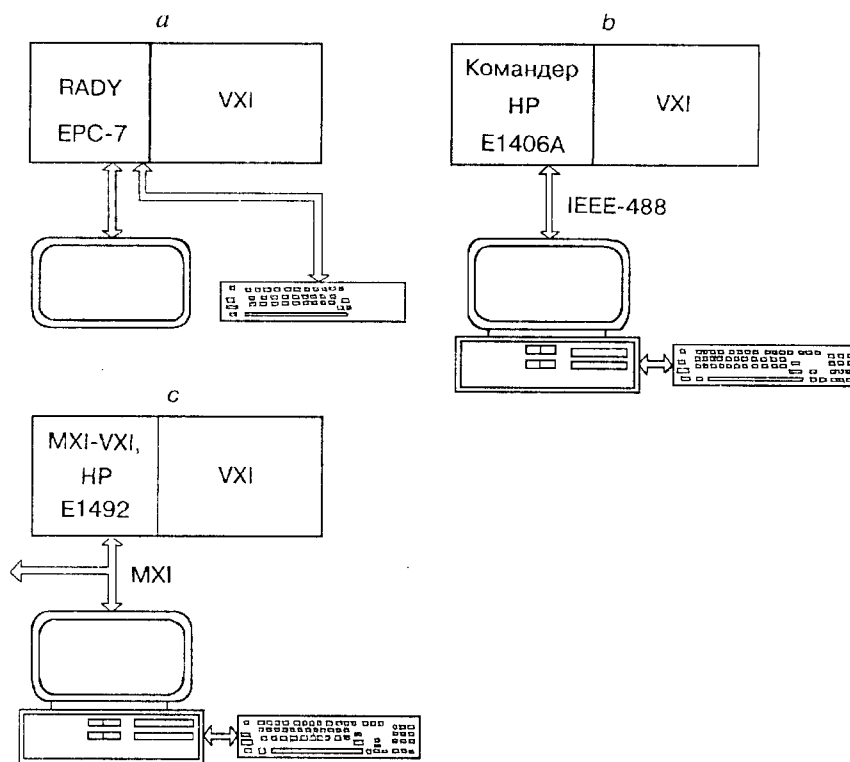


Рис. 2. Способы управления VXI-системой

Авторами разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) с максимальным использованием возможностей, предоставляемых стандартом VXI. При разработке комплекса была поставлена задача создать аппаратуру, способную обеспечить возможность записи в память предельно больших объемов статистических данных для последующей их обработки. Этим настоящий ИВК отличается от описанного в [1], где основные усилия были направлены на обработку данных в реальном времени методом накоплений (реализация одного, хотя и эффективного метода).

Комплексом решается задача сбора данных для статистической обработки широкополосных случайных процессов (сигналов), в частности, например, для построения многомерных законов распределения значений сигнала в моменты, отстоящие от тактового импульса на заданные интервалы времени.

Входными сигналами комплекса являются исследуемый аналоговый сигнал и сигналы цифрового сопровождения.

Функциональная схема аппаратной части комплекса приведена на рис. 3 и включает в себя: группу модулей синтеза временных интервалов, группу модулей амплитудного канала, а также группу модулей памяти.

В качестве базового конструктива использован крейт HP E1401A размером «С». Для управления комплексом применен компьютер EPC-7, занимающий в крейте две левые позиции. Компьютер EPC-7 имеет все атрибуты PC 486 и обеспечивает ресурсы гнезда «0» крейта. В остальных 11 размещены разработанные модули.

Амплитудный канал. Задача измерения сигналов в полосе 500 МГц и динамическом диапазоне свыше 60 дБ с целью последующей обработки цифровыми методами является сложной и не может быть решена традиционными методами. Лучшие АЦП реального времени в настоящее время могут обеспечить требуемую полосу при восьми разрядах, т. е. динамический диапазон 48 дБ. С другой стороны, современные стробоскопические методы и приборы

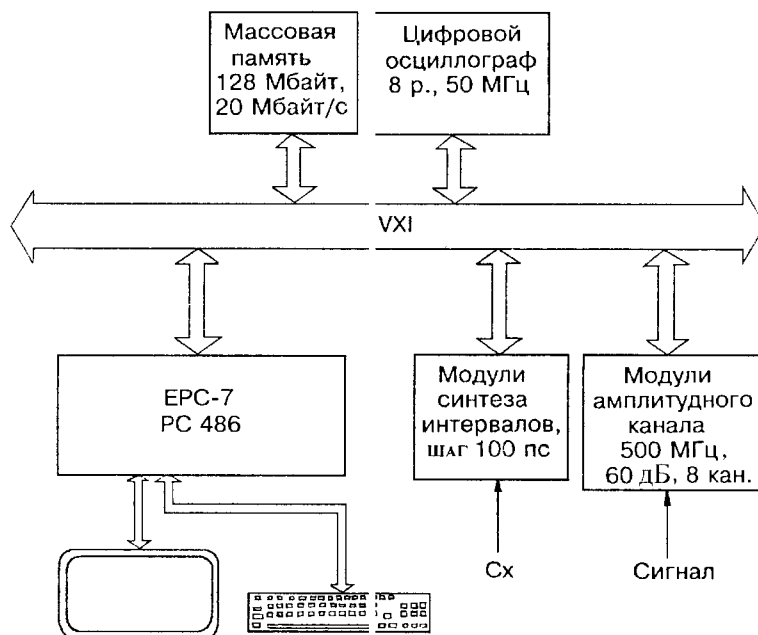


Рис. 3. Аппаратный состав комплекса

обеспечивают полосу до гигагерц в диапазоне 60 дБ, однако по принципу действия они пригодны только для периодических сигналов.

В разработанном комплексе для получения статистик шумовых сигналов используется метод, промежуточный между методом классического аналого-цифрового преобразования реального времени и стробоскопическим методом. Состав амплитудного канала приведен на рис. 4. Сигнал (в каждом из восьми каналов) кодируется одноразрядными АЦП-компараторами, причем преобразование осуществляется относительно предварительно вычисленного для каждого канала порога, соответствующего равным частотам событий «0» и «1» на выходе компаратора (вероятности 0,5 превышения сигналом порога). Эти пороговые уровни для каждого канала вычисляются модулем порогового процессора. Вычисление осуществляется на основе анализа статистики с выходов одноразрядных АЦП при «качании» порогового уровня во всем диапазоне методом, аналогичным методу поразрядного уравнивания. Динамический диапазон и полоса измерительного тракта в этом варианте определяются уровнем шумов и полосой компараторов. Основные аспекты построения измерительной части амплитудного канала изложены в [3], где также рассмотрены некоторые процедуры настройки и оценки параметров измерительного тракта.

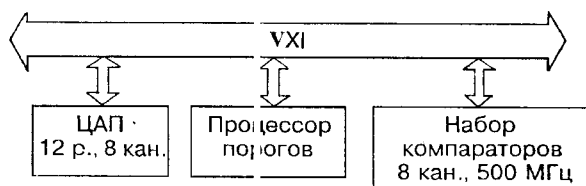


Рис. 4. Амплитудный канал

Хотя компаратор с управляемым порогом и уступает по производительности многозарядным АЦП при оценке основных параметров случайного сигнала, таких, как закон распределения и его моменты, тем не менее для ряда статистических задач подобное решение оказывается достаточно эффективным.

Рассмотрим задачу оценки по независимым отсчетам изменения математического ожидания стационарного гауссового сигнала с математическим ожиданием M и дисперсией σ^2 вследствие аддитивного воздействия малого детерминированного сигнала ΔM .

При использовании АЦП соответствующее изменение математического ожидания (ΔM) оценивается путем усреднения отсчетов АЦП до и после приложения детерминированного сигнала на равных объемах выборки n_1 . Дисперсия оценки математического ожидания с помощью АЦП в соответствии с [4] имеет вид:

$$D[\bar{X}_Q] = \frac{1}{n_1} D[X_Q] \approx D[\bar{X}] + \frac{1}{12} \frac{(\Delta X)^2}{n_1} \approx \frac{\sigma^2}{n_1} + \frac{1}{12} \frac{(\Delta X)^2}{n_1}, \quad (1)$$

где \bar{X}_Q — оценка M (а также $M + \Delta M$); $D[\bar{X}]$ — дисперсия среднего случайного сигнала; ΔX — квант АЦП.

Изменение ΔM по данным с выхода компаратора, порог которого настроен на величину M , после приложения детерминированного сигнала может быть оценено по отклонению вероятности ΔP от уровня 0,5. Величины ΔP и ΔM связаны посредством интеграла вероятности нормального закона распределения, который, согласно [5], можно представить в виде ряда

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{40} - \frac{x^7}{336} + \dots \right),$$

для $x = \frac{\Delta M}{\sigma} \leq 0,03$ члены ряда со степенью больше 1 могут быть опущены при сохранении точности на уровне четырехзначных цифр. Тогда

$$\Delta P \approx \frac{\Delta M}{\sigma \sqrt{2\pi}}. \quad (2)$$

Дисперсия оценки вероятности превышения сигналом порога компаратора по данным на его выходе имеет вид [4]:

$$D[Z] = \frac{P(1-P)}{n_2},$$

где Z — оценка вероятности превышения; P — вероятность превышения; n_2 — объем выборки.

С учетом выражения (2) на основании свойства дисперсии линейной функции находим дисперсию оценки ΔM :

$$D[\Delta M] \approx \frac{2\pi\sigma^2 P(1-P)}{n_2} \approx \frac{2\pi\sigma^2(0,5 + \Delta P)(0,5 - \Delta P)}{n_2}. \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что для $\Delta X \leq \sigma$ примерное равенство дисперсии оценок (1) и (3) обеспечивается при $n_2 \approx \frac{\pi}{2} n_1$.

Таким образом, при использовании компаратора в подобных задачах необходимо увеличение объема выборки в $\sim 1,5$ раза по сравнению с АЦП. Однако такое увеличение компенсируется существенным упрощением аппаратной части, вследствие чего требуемая производительность достигается увеличением числа измерительных каналов.

Остановимся несколько подробнее на описании модуля ЦАП. Модуль вырабатывает восемь прецизионных пороговых уровней напряжений, поступающих на измерительные компараторы. Основным требованием к модулю

является достижение малой дифференциальной нелинейности его шкалы в диапазоне $\pm 4,5$ В. Благодаря наличию в модуле дополнительного ЦАП диапазона, задающего опорное напряжение на 8 рабочих ЦАП, и ЦАП смещения, обеспечивающего смещение всех выходных пороговых уровней, имеется возможность осуществлять как грубую оценку исследуемого сигнала во всем диапазоне амплитудного канала, так и прецизионную с меньшим шагом сканирования на выбранных с помощью ЦАП смещения участках. Шаг сканирования при прецизионной настройке может быть уменьшен до 25 мкВ (дальнейшее уменьшение шага ограничивается ростом дифференциальной нелинейности ЦАП). Все ЦАП модуля (в том числе смещения диапазона) 12-разрядные (K572ПА2А).

В модуле имеется еще один дополнительный ЦАП, задающий порог амплитудной селекции. Применение амплитудной селекции при анализе импульсных сигналов позволяет избежать регистрации в памяти отсчетов, полученных на неинформативном уровне исследуемого сигнала.

Шкала синхронизации. Шкала синхронизации в описываемом комплексе создается тремя модулями. Модуль генератора задержки задает общее смещение начала измерения во всех каналах относительно внешних тактирующих импульсов. Модуль генератора пачки запускается импульсом генератора задержки и формирует синхронные периодические импульсные последовательности, стробирующие измерительные каналы с первого по восьмой. Эти последовательности стробов в каждом последующем канале сдвинуты относительно предыдущего с одинаковым шагом Δt , образуя равномерную временную шкалу (с периодом Δt) для совокупности всех каналов. Модуль генератора строба формирует стробирующий импульс с управляемой задержкой (шаг задержки 2,5 нс) и используется в цепи амплитудной селекции.

При синтезе интервалов времени погрешность ΔT синтезируемого интервала выражается таким образом:

$$\Delta T = \gamma T + \Delta_1 + \Delta_2,$$

где γ — относительная погрешность опорной частоты; Δ_1 — ошибка «старта», обусловленная несинхронностью старта и опорной частоты; Δ_2 — ошибка «стопа» или ошибка квантования.

В обычном таймере максимальное значение Δ_1 и Δ_2 равно периоду опорной частоты, в частном случае синтеза интервалов с внутренним стартом ошибка «старта» отсутствует. Погрешность квантования обычно уменьшается применением двухшкального метода синтеза, при котором период опорной частоты интерполируется на более мелкие кванты. Устранение или уменьшение ошибки «старта» представляет более сложную задачу.

На рис. 5 приведена блок-схема разработанного генератора задержки, в котором ошибка «старта» устраняется путем использования генератора ударного возбуждения (ГУВ) в качестве опорного. Частота ГУВ стабилизируется с помощью петли ФАПЧ и внешнего кварцевого генератора. При каждом запуске ГУВ его фаза обнуляется, вследствие чего система ФАПЧ входит в синхронизм с задержкой 2 мкс. Поэтому при частоте запуска выше 500 кГц петля ФАПЧ не успевает срабатывать и программно разрывается. Предварительно выполняется контрольный цикл, в ходе которого запуск ГУВ блокируется, и с помощью АЦП измеряется выходное напряжение петли ФАПЧ. В рабочем режиме при разорванной петле ФАПЧ это напряжение (с выхода ЦАП) управляет ГУВ, подменяя таким образом выход петли ФАПЧ. Максимальный синтезируемый интервал в этом режиме равен 2 мкс, и необходимая точность обеспечивается параметрической стабилизацией ГУВ.

В схеме рис. 5 используется аналоговый 8-разрядный интерполятор на основе микросхемы генератора задержки AD9500. Диапазон интерполяции 12,8 нс, и теоретически шаг интерполяции равен 50 пс. Практически удалось обеспечить стыковку шкал грубого квантования и интерполяции с точностью 100 пс, эта цифра и будет реальным квантом всего устройства. Погрешность генерируемого интервала составляет $5 \cdot 10^{-6} T \pm 0,5$ нс, где первый член есть

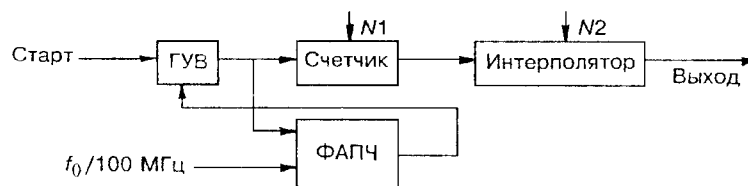


Рис. 5. Блок-схема синтезатора интервалов времени

погрешность кварцевого генератора, а второй член обусловлен неточностью и нестабильностью начальной задержки.

Устройство и принцип работы модуля генератора пачки описаны в [6].

Модули памяти. Созданный ИВК снабжен двумя видами модулей памяти: статической (объемом 1 Мбит) и массовой. Статическая память используется на высоких частотах запуска ИВК до 20 МГц, массовая память работает на частотах запуска до 8 МГц.

Реализованный объем двух модулей массовой памяти (1 Гбит) и скорость записи (120 Мбит/с) достигнуты благодаря использованию современных микросборок SIMM.

Двухпортовый модуль массовой памяти (ММП) по локальной шине в мультиплексном режиме воспринимает данные от амплитудного канала (8 бит) и сигналы цифрового сопровождения (12 бит). Каждые два байта данных укладываются в 18-разрядные слова, содержащие также бит контроля четности и метку, позволяющую отличить данные от сигналов цифрового сопровождения.

Поскольку тактирование измерительной части комплекса осуществляется на различных частотах и по протоколу, определяемому исключительно типом решаемой задачи, запись информации в блок динамической памяти импульсами, тактирующими измерительную часть, осуществить очень сложно (в основном из-за необходимости проведения циклов регенерации памяти). Вследствие этого на выходе ММП применен согласователь потоков данных, состоящий из двух блоков статической памяти, запись в которые осуществляется поочередно строками от измерительной части ИВК [7]. Для переписи информации в динамическую память используется принцип блочной передачи данных (по запросу от согласователя) синхросигналами от шины единой синхронизации крейта VXI (10 МГц).

При больших массивах статистической информации (после ее обработки, в частности, методом накоплений) становятся заметными регулярные переходные процессы адресного счетчика памяти (даже несмотря на гальваническую развязку измерительных цепей от цифровых). Поэтому адресный счетчик согласователя потоков данных ММП выполнен в коде Грея, минимизирующем подобные наводки.

Следует отметить также и другие меры, принятые для защиты измерительных цепей от помех и наводок. Все измерительные цепи выполнены гальванически развязанными от цифровой части. Модули обеспечены защитными экранами (стандартными для VXI). Модуль генератора задержки снабжен оптической линией запуска от исследуемого объекта, подобная же линия предусмотрена для приема одного из сигналов цифрового сопровождения.

Программное обеспечение. Разработанное программное обеспечение позволяет производить установки режимов модулей, тестирование, калибровку, математическую обработку данных, отображение и печать результатов. Программным обеспечением реализуется концепция виртуальных приборов, что предоставляет возможность быстрого и удобного управления модулями.

Реализованы два варианта программ: 1) на основе стандартного пакета LabWindows, 2) с использованием пакета HP ITG-2. Первый вариант, ориентированный на работу с регистровыми модулями, обеспечивает высокую ско-

рость обмена данными, что позволяет реализовать требуемую производительность ИВК. Однако такое программное обеспечение недостаточно унифицировано, и, в частности, при замене модуля в ИВК на аналогичный по функциональным возможностям требуются значительные программные изменения.

Стандартный пакет HP ITG-2 обеспечивает управление модулями на основе сообщений, поэтому при реализации второго варианта потребовалось для регистровых модулей разработать драйверы, позволяющие программным образом представить такие модули, как модули на основе сообщений. Программы на основе пакета HP ITG-2 обеспечивают гибкость и полностью унифицированы (в частности, снимают программные проблемы при замене модуля на аналогичный). Однако в пакете HP ITG-2 не решена задача обработки результатов измерений, что требует применения дополнительных программных средств. Основным же недостатком такого программного обеспечения является низкая скорость обмена данными, поэтому оно применимо только для задач, где не требуется высокой производительности ИВК. Видимо, для реализации перспективного способа взаимодействия на уровне сообщений необходимо создание более совершенных стандартных программ.

В результате проделанной работы разработан высокопроизводительный измерительно-вычислительный комплекс, обладающий уникальными возможностями: по полосе измеряемых сигналов — 500 МГц; временному разрешению датировки отсчетов — 100 пс; объему памяти регистрируемых данных — 1 Гбит; динамическому диапазону исследуемых сигналов — 60 дБ.

Комплекс отличается помехозащищенностью, гибкостью и приспособляемостью к решению новых задач сбора и обработки информации, а также простотой управления (за счет применения концепции виртуальных приборов).

Полученные свойства комплекса во многом определяются использованием стандарта VXI. Опыт разработки комплекса показал, что возможности стандарта VXI при его проектировании не исчерпаны и имеется резерв для увеличения производительности комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачурин В. В., Булгаков А. Ю., Выхин В. Н. и др. Цифровой осциллограф — измерительно-вычислительный комплекс для регистрации и обработки широкополосных случайных сигналов // Автометрия. 1991. № 5. С. 93.
2. Instrumentation Reference and Catalogue. Test and Measurement // Proc. Monitor. and Control: National Instruments, 1995.
3. Шалагинов Ю. В. Широкополосный измеритель статистических характеристик случайных сигналов // Автометрия. 1996. № 2. С. 34.
4. Корн Г. А. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. М.: Мир, 1968.
5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Сов. радио, 1966.
6. Попов Ю. А. Быстродействующее устройство регулировки фазы кварцовой последовательности импульсов // ПТЭ. 1996. № 4. С. 56.
7. Булгаков А. Ю. Согласователь потоков данных // ПТЭ. 1997. № 1. С. 77.

Поступила в редакцию 28 февраля 1997 г.