

УДК 620

Р. Сундер

«ЗАО» БИСС (субсидиарная единица ITW-США), г. Бангалур, Индия

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИКИ, ОТВЕЧАЮЩЕЙ СОВРЕМЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

Исследовательская работа в условиях глобализованного рынка выдвигает новые требования к испытательной технике и оборудованию — быть одновременно как гибкими и функциональными в приложении, эксплуатации, так и привлекательными по стоимости. Настоящая работа посвящена обзору новых разработок как по материальной части, так и по программному обеспечению, направленных на удовлетворение этих требований. Такие разработки требуют тесного контакта как с инженерами-испытателями, так и с источниками новых типов комплектующих. Приведены примеры приложения разработок к испытаниям материалов газотурбинных двигателей и конструкционных элементов на прочность, долговечность, циклическую ползучесть и трещиностойкость.

Ключевые слова: испытательная техника, объединенная архитектура управления.

Введение

Современные пакеты программного обеспечения для расчета конструкционных элементов позволяют с высокой точностью определять поля распределения деформаций, включая локальные картины у надрезов и соединений. Такие расчеты, совмещенные с оценкой условий эксплуатации, и моделированием повреждаемости, дополненные высоким качеством конструкционных материалов и уровнем технологии производства, дают достаточно высокую повторяемость обеспечиваемой прочности и долговечности несущих деталей. С одной стороны, это позволяет сокращать объем испытательной работы. Но с другой стороны, поднимаются требования как к качеству воспроизведения условий испытания, так и к объему информации, собранной в процессе самого испытания. Последнее приобретает особое значение в условиях постоянного появления на рынке новых датчиков и техники наблюдения (мониторинга и контроля) за процессом испытания. Нужно также отметить, что постоянное развитие новых материалов, включая композиты и керамику, и способов их соединения сопровождается созданием новых стандартных процедур по проведению испытаний и интерпретации их результатов. Помимо этого, наиболее конкурентоспособные предприятия, как правило, разрабатывают свою специфическую методику проведения испытаний и интерпретации данных на всех стадиях процесса разработки новых продуктов — получения характеристик используемых материалов, сравнительной оценки конструкционных решений и поверочных испы-

таний на гарантийный и межремонтный срок службы, а также и на остаточную прочность при наличии дефектов или эксплуатационных повреждений.

В виду вышеприведенных обстоятельств фирма БИСС уделяет большое внимание как разработке новых технических решений испытательной техники, так и проведению контрактных испытаний на производственной площади самого предприятия. Данный подход представляет уникальную возможность тщательно проверять и доводить новую технику при разнообразнейших условиях, выставляемых многочисленными клиентами. Он также способствует подготовке персонала для испытательных работ и позволяет оказывать своевременное содействие как покупателям испытательной техники, так и заказчикам испытательных работ, по эксплуатации испытательной техники, и по разработке и внедрению новых методик испытаний.

1. Архитектура системы управления

Возможности и ограничения испытательной техники, прежде всего, определяются архитектурой системы управления, состоящей из контроллера, поддерживающего работу аппаратной части, и системного программного обеспечения на персональном компьютере, поддерживающего работу прикладных программ. Ниже описывается объединенная «MultiChannel-MultiStation» (MCMS - МультиКанальная-МногоСтанционная) архитектура системы управления, успешно развиваемая командой БИСС на протяжении трех десятилетий (см. рис. 1).

Архитектура MCMS предусматривает синхронное цифровое управление множества каналов и множества испытательных станций. Разработанная на базе этой архитектуры и встроенная в контроллер единая многозадачная программная среда предоставляет широкую гамму возможностей от управления простыми настольными машинами до контроля комплексных систем испытания конструкций при сложном нагружении. Подобное решение позволяет конфигурировать и независимо управлять целой батареей установок в лаборатории с одного контроллера.

«Двигателем» контроллера служит комбинация цифрового процессора (DSP) и программируемого массива логических цепей (FPGA). FPGA служит интерфейсом и управляющим звеном электроники испытательной машины, куда

входят гибридные схемы, включая программируемые усилители сигналов, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Таким образом, сбор показаний датчиков и вывод управляющих сигналов производится без участия самого DSP. Сам DSP сосредотачивается на выполнении расчетов, связанных с обработкой данных, генерированием команд, расчетом уравнения управления сервоканалами и обменом данными с управляющим персональным компьютером. Постоянное наращивание мощности DSP и объема FPGA на протяжении последних пятнадцати лет позволило существенно расширить количество управляемых и измерительных каналов, а также легко синхронизировать работу множества гидrocилндров при частотах до пятидесяти герц на базе одного контроллера.

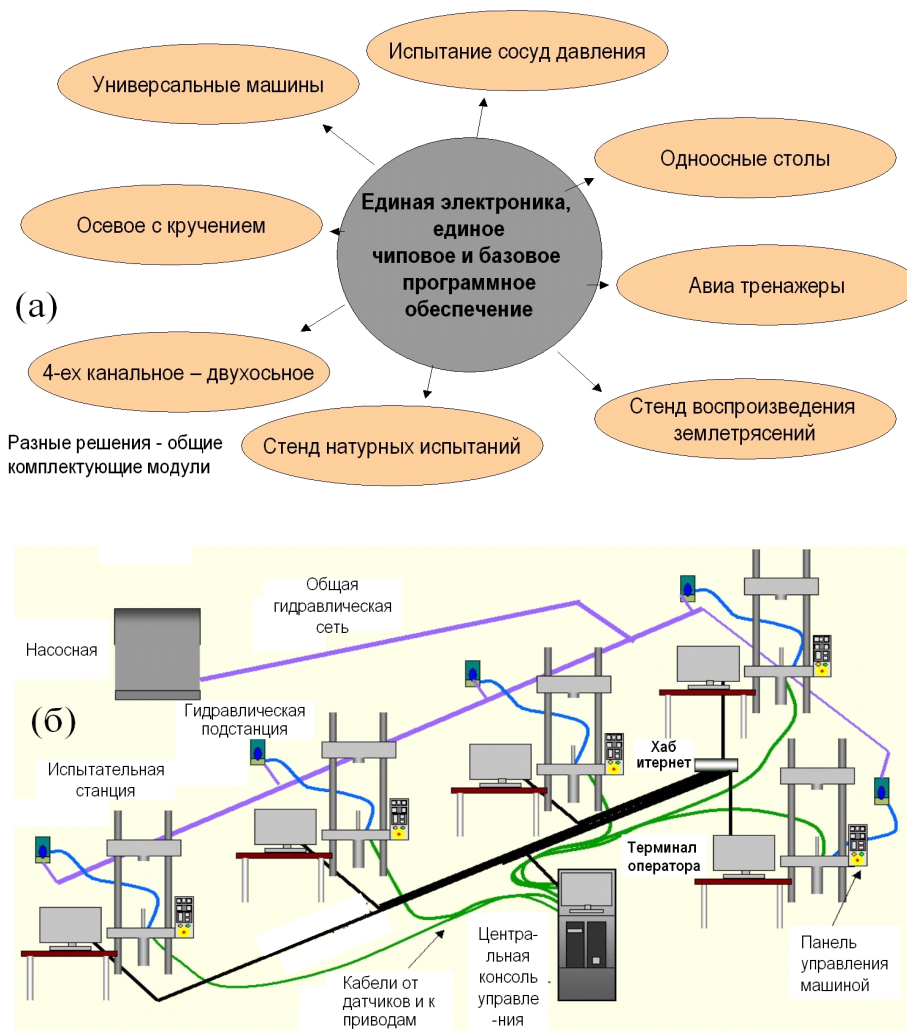


Рис. 1. (а) Единый контроллер, разные приложения. (б) Тот же контроллер в управляющей роли целой лаборатории

Важно отметить, что стоимость самого DSP-FPGA «двигателя» незначительна по сравнению

со стоимостью потребной гибридной электроники каналов измерения. В то же время, его мощ-

ность как по расчетам, так и по интерфейсу с электроникой огромна. В зависимости от потребностей конкретной испытательной системы (или их совокупности) подбирается необходимая комплектация модульной электроники в зависимости от количества измерительных и управляющих каналов и связанных с ними датчиков и приводов. Сам «двигатель» и вписанное в него системное программное обеспечение остаются единым. Именно на этой основе разработана единая модульная архитектура «Multi-Channel-MultiStation» (MCMS) как материальной части контроллера, так и его системного программного обеспечения. Последняя версия «двигателя» способна проводить выше двух миллиардов операций с плавающей точкой и одновременно задавать и считывать сотни расчетных и измерительных каналов электроники. Рис. 1 а, б иллюстрируют разновидность задач, которые решает контроллер. Лаборатории, исполненные по схеме рис. 1 б, уже несколько лет служат испытательной базой для множества ведущих фирм, включая такие многонационалы как Airbus, Boeing, GM, GE, Honeywell и LM Wind Energy.

Опыт работы с широкой разновидностью потребностей экспериментальной работы привел к установлению устойчивой архитектуры как материальной части, так и системного программного обеспечения. Так, имеется широкий выбор электронных модулей, обеспечивающих совместимость практически всех коммерчески доступных датчиков с системой сбора данных. Кроме мостовых датчиков таких как силоизмерители, экстензометры и индуктивные датчики перемещения, подключаемые термодары и датчики ускорения, а также линейные энкодеры, обеспечивающие стабильную точность измерения перемещения штока до 0,1 микрона в динамике, что позволяет получать и соответствующее качество эксперимента. Сама система сбора данных построена вокруг 24-битовых преобразователей, обеспечивающих разрешающую способность измерения лучше, чем 10^{-6} доли размаха датчика.

С другой стороны, каналы управления совместимы с широкой разновидностью приводов, включая гидроцилиндры одностороннего и двухстороннего действия, сервомоторы, электромагнитные и электромеханические винтовые приводы, пневмоцилиндры и всевозможные устройства нагрева и охлаждения. Сам контроллер рассчитан на управление совокупностью станций, каждая из которых привязана к заданной комбинации управляемых и измерительных каналов. Количество станций и каналов ограничено только физической компоновкой контроллера и управляющего персонального компьютера.

Программное обеспечение на самом DSP и FPGA включает широкий выбор синхронно вы-

полняемых по каналам, встроенных функций по сбору данных и управления:

- сбор показаний датчиков с заданной поправкой по фазовому сдвигу в зависимости от типа датчика и параметров фильтров;

- пересчет показаний в целях учета закона управления или физики процесса, например, поправка на термическую деформацию образца при испытании на термомеханическую усталость в жестком режиме;

- осреднение показаний и выявление пиков и долин при циклическом нагружении;

- генерирование цифрового командного сигнала заданной формы и сдвига по фазе (при многоканальном синхронном нагружении);

- расчет многопараметрового уравнения сервоуправления с заданными коэффициентами и с динамической поправкой на мгновенную жесткость системы;

- смежный режим сервоуправления, например, мягкий по среднему и жесткий по амплитуде, что желательно при исследовании эластомеров и эффекта среднего напряжения на малоцикловую усталость;

- адаптивная поправка амплитуды и среднего при циклировании до 500 Гц для точного воспроизведения заданных параметров нагружения;

- обеспечение защиты оператора, машины и образца путем слежения за показаниями индивидуальных каналов измерения по отношению к заданным предельным значениям, а также за состоянием логических каналов.

Все вышеприведенные функции выполняются с частотой возобновления петли управления от 3 до 10 кГц в зависимости от нагрузки на систему. Таким образом, все операции, требующие решения в реальном времени, замыкаются на самом контроллере, причем с гарантированной синхронизацией их исполнения. Задача конфигурации самого процесса индивидуальных испытаний и его анализа, включая сбор и обработку показаний, а также подготовки отчета об эксперименте решается на персональном компьютере, посредством коммуникационного интерфейса USB.

Интерфейс служит «софт-шиной», через которую от прикладных программ на управляющем компьютере поступают команды в контроллер на исполнение конкретных задач на индивидуальных машинах. Этот процесс координирует основная управляющая программа, MTL32, которая также выполняет ответственную работу по сбору, сортировке и предварительной обработке состояния испытательного комплекса, а также массивного потока показаний каналов управления и обратной связи, постоянно поступающих от контроллера.

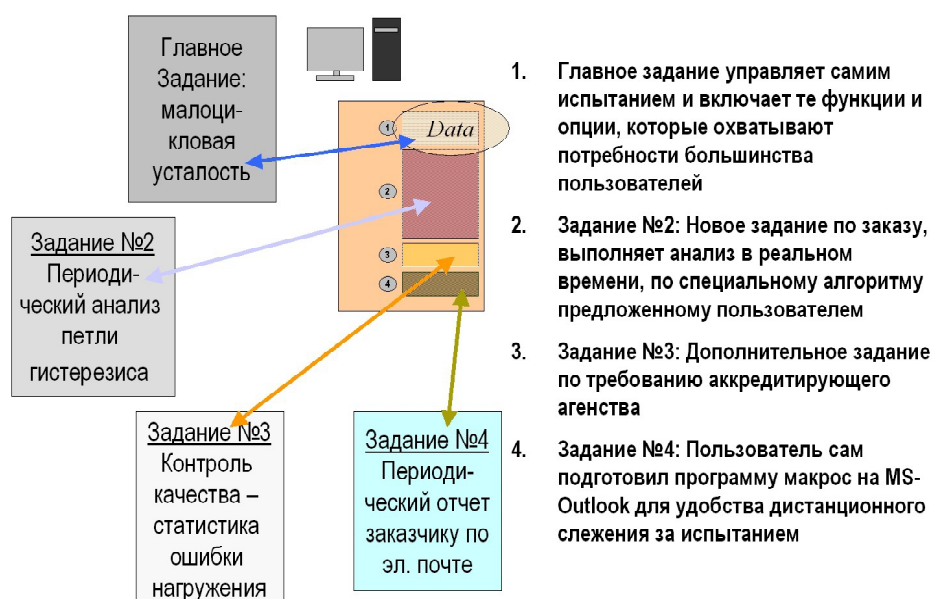


Рис. 2. Возможности исполнения схемы работы множества задач на единое задание

Потребности сбора и обработки показаний могут широко меняться от задачи к задаче как в качественном, так и в количественном плане. Большинство задач статического испытания требуют показания очень хорошего качества, но с частотой не выше 10-20 Гц. Испытания при высоких скоростях нагружения предполагают возможность достаточно достоверно отражать имеющиеся переходные процессы. Испытания при циклическом нагружении требуют регистрацию пика и долины в каждом цикле и периодические записи полного цикла. А при испытании на трещиностойкость, а также при малоцикловой усталости, требуется периодическая оценка податливости при разгрузке, причем, по данным в определенном заданном окне интервала нагружения. Все эти требования учтены и встроены в соответствующие алгоритмы MTL32. Прикладным программам достаточно запросить нужную им информацию, и пакеты данных в требуемом объеме и форме будут предоставлены.

Общепринято, что подготовка новой прикладной программы для управления испытанием в реальном времени нелегкий труд даже для опытного программиста. Не зря такие программы стоят так дорого. При создании и доводке системного обеспечения MTL32 ставилась задача вообще освободить прикладного программиста от нагрузки реального времени, а также от нудных операций по обработке данных. Требовалось защитить его и от сложной схемы исполнения архитектуры MCMS, связанной с множеством станций и каналов, подсоединенных к единому контроллеру. Эффективность MTL32 достигается благодаря описанной ниже, уникальной структуре программного обеспечения.

2. Схема глобального деления памяти «GDS»

Когда один контроллер управляет множеством испытаний, неизбежна совместная работа группы прикладных программ на управляющем компьютере (см. рис 1б). Даже при работе одной машины, новый эксперимент может потребовать решения нескольких независимых задач в реальном времени. Пример такого случая приведен на рис. 2. Возможность интеграции на месте существующих и новых заданий позволяет расширить возможности готовых решений и адаптировать их к конкретным потребностям. А еще лучше иметь возможность самому программировать свои новые дополнения, причем на привычном для себя языке, да еще отлаживать их, не нарушая при этом ход проходящего эксперимента.

В программном исполнении это, прежде всего, требует возможности совместно работающим программам иметь параллельный доступ к потоку информации о показаниях каналов измерения и общем состоянии каждой из машин. К сожалению, стандартные приемы программирования, предусмотренные на MS-Windows не совместимы с требованиями свободного и быстрого доступа к данным в памяти, что необходимо при работе в реальном времени. Рис. 3 иллюстрирует проблему. Если информация делится между множеством заданий, процесс линейно замедляется. А если отдельные данные будут еще модифицироваться индивидуальными заданиями, процесс может не только усложняться, но и привести к непредвиденным результатам.

Это связано со встроенной в MS-Windows защитой памяти индивидуальных задач, которая не позволяет одной задаче менять или даже «заг-

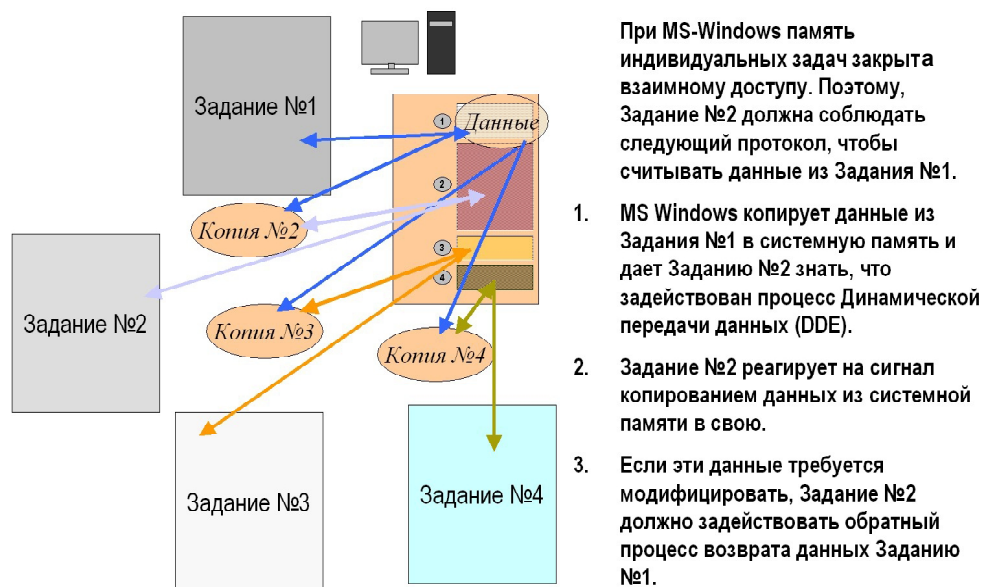


Рис. 3. Ограничения MS-Windows при совместной работе группы программ (.exe)

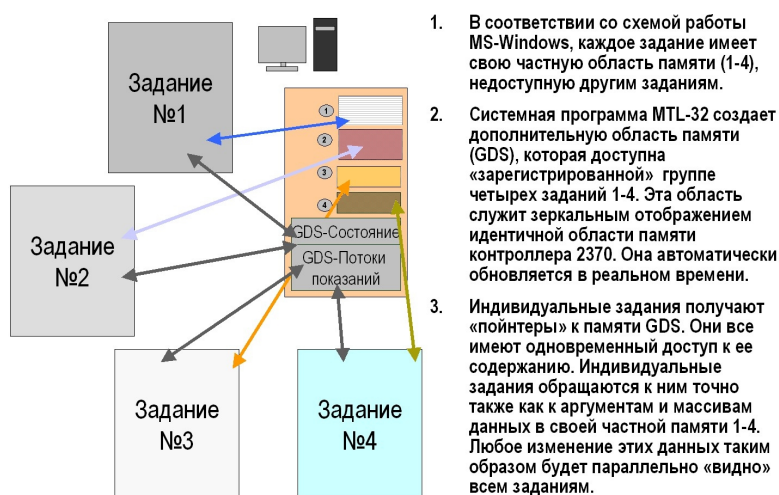


Рис. 4. Схема глобального деления памяти GDS разработки фирмы БИСС

лядывать» на содержание данных другой задачи, кроме как через приписанный на рис. 3 протокол DDE. Очевидно, данный протокол приведет к недопустимым затратам времени процессора на пересылку данных внутри памяти, тем самым притормаживая управление испытаний в реальном времени. Кроме того, присутствует опасность последствий асинхронности их искаженного представления перед отдельными совместно работающими программами. Эти проблемы сильно разбавляют значимость достоинств операционной среды MS-Windows, таких, как доступность

PC, наличие огромного выбора периферийных устройств, широкий выбор прикладных программ общего назначения и, самое главное, хорошее знакомство с PC среднего пользователя.

Учитывая неотъемлемые достоинства PC с одной стороны, и недопустимые ограничения MS-Windows в отношении частного случая работы с контроллером в вышеописанном режиме, с другой стороны, была разработана новая схема работы программного обеспечения в режиме глобального деления памяти (GDS). Рис. 4 схематически описывает работу совокупности программ в ре-

жине GDS. Следует отметить, что быстродействие MS-Windows не страдает при этом от работы множества заданий, поскольку нет необходимости *копировать и передавать* данные.

3. Организация работы испытательного комплекса в режиме MCMS

На рис. 5 схематически показана организация испытательного комплекса, состоящего из пяти испытательных машин. Он построен на шинах 1-4. Шина №1 построена по описанной выше архитектуре GDS. Системная программа MTL32, а также все прикладные программы, связанные с испытательным комплексом размещены на управляющем PC. Состояние подключенных машин, а также потоки показаний от них постоянно обновляются в GDS через USB интерфейс. При получении очередного пакета данных от контроллера, MTL32 проводит их предварительную обработку, в частности по перечисленным выше алгоритмам. На протяжении этого процесса, все поступающие данные переводятся в нужные инженерные единицы. Затем, проводится сортировка обработанных данных для их привязки к индивидуальным виртуальным станциям (машинам) внутри GDS. Таким образом, предусмотрена естественная защита памяти, отведенной индивидуальным станциям. В итоге, индивидуальные прикладные программы будут видеть и могут менять только ту информацию, которая касается конкретной испытательной машины.

Система не ограничивает количество прикладных программ, «регистрирующихся» для работы с определенной машиной. И все эти программы

будут иметь параллельный доступ к отведенной им общей области GDS.

Шина №2 — это рабочая память MS-Windows, в которой, в режиме деления времени, работают все активные программы, включая прикладные программы, связанные с проходящими испытаниями. Совместная работа прикладных программ в рамках MCMS происходит либо по вызову, либо по «самовывозу». Для *управляющего* воздействия на испытательный процесс, прикладная программа производит вызов соответствующей подпрограммы из библиотеки MTL. При работе в режиме обработки поступающего потока показаний от машины, прикладная программа работает в режиме *самовывоза*, при котором система по появлению пакета данных производит вызов заданной подпрограммы, находящейся в прикладной программе. Этот режим работы в значительной степени увеличивает как эффективность работы программ, так и возможности внедрения даже самими пользователями новых алгоритмов обработки данных в реальном времени.

GDS представляет собой совокупность данных. А двоичный формат данных в памяти не зависит от языка программирования, на котором была подготовлена прикладная программа. Ввиду этого, практически нет ограничений в плане выбора языковой платформы при создании новых программ. Например, пользователь знакомый с MS-XL, желающий обрабатывать своим новым алгоритмом и в реальном времени поступающие от машины данные, может перевести свой алгоритм в XL-Macros, и загрузить его в режиме самовывоза. Он также может отладить его в реаль-

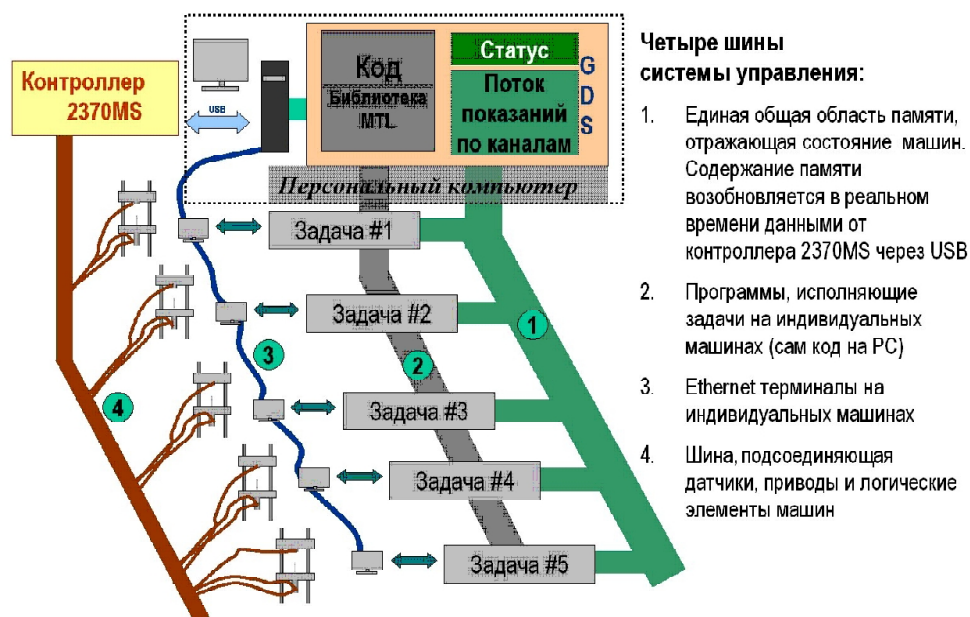


Рис. 5. Внедрение схемы GDS в управление батареями машин

ном времени, без всякого беспокойства по замедлению или сбою основной задачи, решаемой на машине.

Возможности асинхронной загрузки и даже отладки прикладных программ без особой подготовки по программированию может представлять интерес широкому кругу опытных инженеров-испытателей, а также ученых-исследователей механических свойств в поиске новых методов экспериментирования. Примером служит схема организации группы прикладных программ, показанная на рис. 6, которая включила внедрение коммерчески доступного фотоаппарата для периодической съемки объекта испытания.

Следует отметить, что поставки испытательной техники фирмы БИСС сопровождаются полной документацией библиотеки MTL, которая сама поставляется без ограничений на переустановку. Кроме этого, фирма предлагает стажировку пользователям, желающим готовить свои программы для конкретных задач.

Шина №3 (рис. 5) — это стандартная сеть Ethernet, которая позволяет соединять терминалы с компьютером. В целях эргономики каждой испытательной машине выделяется свой терминал. Терминалы работают в стандартном режиме MS-Windows без потребности специальных лицензий. Индивидуальные задания автоматически вызываются системной программой при изменении содержания GDS.

Шина №4 предназначена для подвода к контроллеру кабелей от всевозможных датчиков, включая силоизмерители, экстензометры, датчики раскрытия трещины, тензомосты и сами тензодатчики, индуктивные датчики перемещения,

скорости и ускорения, термопары, энкодеры и пр. Преобразователи сигнала от датчиков предусматривают программную настройку. Кроме этого, все датчики, построенные на тензомостах, предусматривают автокалибровку. Нужно отметить, что асигнование датчиков логическое. Перевод датчиков от одной машины к другой не требует их переключения или повторной калибровки. Контроллеры серии 2370 совместимы со всеми промышленно доступными датчиками, включая те, что используются на испытательных машинах иных марок. Благодаря этому, многие испытательные машины самых разных марок модернизированы и доведены до полного цифрового управления в режиме MCMS.

4. Обеспечение эффективности и экономичности эксплуатации испытательной техники

Описанная выше организация системы управления обеспечила высокую эффективность, надежность и экономичность в эксплуатации благодаря единой архитектуре и стандартным наборам комплектующих. Фирмой БИСС также внедрены многие конструктивные решения, направленные на снижение стоимости эксплуатации испытательной техники:

- Стремление к расширенному использованию промышленно доступных комплектующих. К примеру, вся электроника контроллера 2370 построена на комплектующих с однополярным питанием 5 в, что позволило увеличить надежность и неприхотливость электроники и применять легкодоступные и надежные блоки питания от РС.

- Замена двухступенчатых сервоклапанов клапанами прямого действия. Они более доступные,

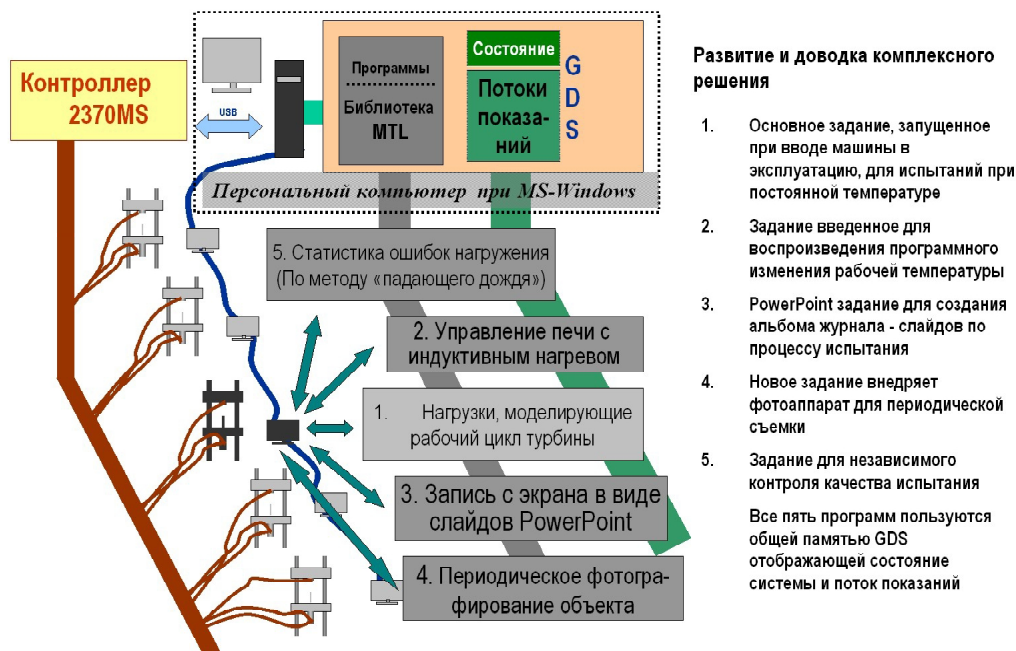


Рис. 6. Внедрение схемы GDS в организацию совместной работы комплекса заданий

менее чувствительные к загрязнению масла и, таким образом, более надежные. Они положительно показали себя на сотнях установок на протяжении 20 лет.

- Внедрение сервоуправляемых насосов расходом от 4 до 300 л/мин. Эти насосы работают с переменными оборотами, и таким образом, минимизируют расход масла через предохранительный клапан. Это в свою очередь снижает шум и потребляемую электроэнергию на 30-60%, а также нагрев масла. Решение оправдано успешной эксплуатацией новой техники на протяжении 10-ти лет.

- Внедрение линейных энкодеров с разрешающей способностью до 0,1 микрона в качестве датчика перемещения штока гидроцилиндра. Помимо чрезвычайно высокой точности движения штока и управления машины в жестком режиме, новая техника позволила разработку методики измерения длины трещины без использования датчика раскрытия. Эта техника внедрена на машинах, работающих в условиях «горячих камер».

В настоящее время на фирме ведется работа по дальнейшему распространению архитектуры MCMS. В частности, следующее поколение контроллеров будет приспособлено к работам по мониторингу при совместимости с планшетами на базе операционной системы Android с целью повышения доступности и гибкости как испытательной, так и измерительной техники.

4. Заключение

Непосредственное участие в широком спектре испытательных работ и тесное сотрудничество с коллективами инженеров-испытателей во всем мире на протяжении двух десятилетий позволили разработать инновационную испытательную технику. Ее доступность, неприхотливость в эксплуатации и расширяемость позволяют приспособляться к постоянно растущим требованиям исследовательской работы в условиях глобализации.

Поступила в редакцию 07.06.2012

R. Sunder. Design features of technology that satisfy the demanding requirements of testing materials and structural elements for fatigue and fracture

Research and development in a globalized market demands test technology that is both flexible in application as well as affordable. This is a review of new developments both in hardware as well as software, directed at satisfying these requirements. Such developments demand constant touch with emerging needs of test engineers as well as emerging component technology in the market. Examples are illustrated showing the application of new developments to testing gas turbine materials and structural elements for strength, endurance, cyclic creep and fatigue crack growth.

Key words: test technology, unified control architecture.