

## ТЕСТИРОВАНИЕ ОС РВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА СТЕНДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

В.М. Мирхайдаров (ПАО «РКК «Энергия»)

Для выполнения космических роботизированных сборочных операций на контактной фазе причаливания необходимо высокоточное наведение, которое может обеспечиваться включением в контур управления человека оператора, формирующего команды манипулятору на основе информации, получаемой от телекамер. Такие динамические операции, в которых задействован человек, должны моделироваться в реальном времени. Для этого необходимо использовать операционные системы реального времени (ОС РВ). В статье дается обзор ОС РВ, описываются способы и результаты тестирования для дальнейшего применения на математическом стенде моделирования космических сборочных операций.

Ключевые слова: операционные системы, реальное время, моделирование космических манипуляторов.

### Введение

Любая сборочная операция представляет собой управляемый процесс соединения объектов посредством установления между ними механических связей, которые реализуются через силы контактного взаимодействия.

Отработка управления манипулятором SSRMS (Space Station Remote Manipulator) международной космической станции (МКС), в том числе и на контактной фазе сборочных операций, выполнялась на полунатурных [1] или математических [2] стендах РВ. Последние обеспечивают наиболее корректное воспроизведение динамических свойств механической системы, максимальную гибкость и минимальные затраты в процессе отработки.

Математический стенд [3] предназначен для отработки в РВ режимов и способов управления космическим манипулятором ERA (European Robotic Arm) при выполнении им сборочных операций с участием оператора. Одним из требований моделирования космических роботизированных сборочных операций с участием человека-оператора является режим РВ. Функционирование процесса в системе «жесткого» РВ — это его способность обеспечить реакцию внутри жестко заданного временного интервала. Выход за пределы этого интервала является отказом и ведет к невозможности решения поставленной задачи. Поэтому основными параметрами системы реального времени являются временные характеристики выполняемых процессов. Также существуют системы «мягкого» реального времени, в которых нарушения временных характеристик приводят лишь к снижению качества работы системы.

В настоящее время на математическом стенде штатно используется ОС Windows 7, которая при отключении лишних служб, процессов и расстановке необходимых приоритетов для выполняемых задач обеспечивает режим «мягкого» РВ. Поэтому одним из направлений развития стенда является переход на ОС жесткого РВ.

### Обзор ОС РВ

Требования к вычислительно-управляющим системам, в том числе к ОС, в которых реализовано

ПО РВ, изложены в стандарте POSIX 1003.4 рабочего комитета IEEE (Standard for Information Technology). Этот стандарт определяет ОС как систему РВ, если она обеспечивает требуемый уровень сервиса за вполне определенное, ограниченное время.

В качестве тестируемых ОС РВ используются: MS DOS, Багет, Windows RTX, Linux-RT. Для соответствия требованиям РВ всех расчетов модели манипулятора и контактного взаимодействия стыковочных интерфейсов ОС должна поддерживать многопоточность разрабатываемых приложений, а также использование многоядерности процессора. Поэтому для дальнейшего использования на математическом стенде рассматривались только Windows RTX и Linux-RT, результаты которых сравнивались с результатами MS DOS (это пример выполнения отдельного потока на отдельном ядре процессора). Тестирование ОС Багет 2.0 проводилось с целью оценки использования этой ОС для других специализированных задач.

MS-DOS — однозадачная ОС жесткого РВ, которая для работы использует только одно ядро процессора.

Багет 2.0 (ос2000) [4] — многозадачная отечественная ОС РВ, разработанная НИИСИ РАН для микропроцессоров MIPS и Intel. Для работы система также использует только одно ядро процессора. ОС имеет закрытую лицензию. Экспериментальные образцы ОС, компилятора и отладчика были переданы в ПАО «РКК «Энергия» от НИИСИ РАН для изучения, опробования, тестирования и отладки программ. При этом ПАО «РКК «Энергия» обязалось ни при каких обстоятельствах не передавать экспериментальные образцы или их фрагменты какой-либо третьей стороне.

Разработка ос2000 базировалась на следующих принципах: соответствие стандарту POSIX, мобильность, масштабируемость, использование концепции микроядра, использование объектно-ориентированного подхода, кросс-разработка.

В качестве платформы для системы использована ОС Linux. Кросс-разработка подразумевает наличие двух ЭВМ: инструментальной с UNIX-подобной ОС и целевой, для которой разрабатывается ПО.

Windows RTX — расширение «жесткого» РВ для ОС Windows. Разработчиком RTX является компа-

ния IntervalZero, Inc., официальным представителем которой в России является ЗАО «РТСофт». Была установлена ознакомительная версия ОС: пакет исполнения RTX64 Runtime, который интегрируется с ОС Windows 7, а также пакет RTX64 SDK, который интегрируется со средой разработки Microsoft Visual Studio 2010. Программный продукт позволяет использовать многоядерность процессора, многозадачность и многопоточность. Windows RTX имеет закрытую лицензию. Цена на право пользования ПО RTX64 2013 SDK, включая год технической поддержки, на момент апреля 2015 г. составляла 9859 долл. США. Цена на право пользования ПО RTX64 2013 Runtime Professional (позволяет задействовать семь ядер процессора для приложений РВ) на момент апреля 2015 г. составляла 654 долл. США. Цена на право пользования ПО RTX64 2013 RT-TCP/IP Stack (подсистема добавляет способность сетевого взаимодействия приложениям РВ) на момент апреля 2015 г. составляла 16 долл. США.

PREEMPT\_RT (Linux-RT) — патч стандартного ядра Linux, позволяющий переконфигурировать стандартное ядро на работу в режиме жесткого РВ. Для создания тестирующих программ использовалась среда разработки Eclipse с компилятором GCC. Для адаптации стандартного ядра Linux к РВ используется два подхода:

- преобразование схемы вытеснений или приоритетного прерывания обслуживания ядра (kernel preemption);

- ввод еще одного программного уровня, то есть дополнительного ядра, внутри или параллельно существующему ядру Linux.

Операционные системы RTLinux (Wind River), Xenomai, RTAI основаны, главным образом, на втором подходе. Патч PREEMPT\_RT использует первый подход. Одно из самых важных достоинств этого подхода заключается в том, что в нем используются те же интерфейсы API, что и в ядре общего назначения. Разработчики (как и раньше) могут использовать существующие POSIX совместимые API. Во втором подходе, наоборот, переход на новый интерфейс является обязательным условием.

В качестве дистрибутива использовалась 64-рядная ОС Fedora 21. В качестве стандартного «ванильного» ядра использовался 3.18.11, в качестве PREEMPT\_RT-патча — 3.18.11-rt6.

С помощью PREEMPT\_RT-патча стандартное ядро было переконфигурировано на работу в жестком РВ и применены следующие настройки ядра:

- включена опция High Resolution Timer Support (поддержка высокоточных таймеров);

- processor family — x86\_64; — (архитектура используемого процессора);

- изменена опция Preemption Mode на Full Preemption (Real-Time) (полностью вытесняемое ядро);

- в опции Timer frequency выбрано значение 1000 Гц (частота проверки простоя процессора);

- отключены опции: Power Management Debug Support (отключить поддержку отладки энергопотребления); Suspend to RAM and standby (отключить сброс системной информации в оперативную память и простой компьютера); Hibernation (отключить сброс системной информации на жесткий диск компьютера и режим сна); ACPI (включить усовершенствованный интерфейс управления конфигурацией и питанием, необходим для работы высокоточного таймера); CPU Frequency scaling (выключить масштабирование частоты процессора); Watchdog Timer Support (отключить отладку таймеров);

- в разделе Kernel hacking все опции отключены (отключить все службы для отладки ядра ОС).

ОС Linux-RT имеет открытую лицензию GNU GPL на свободное ПО.

### Способ тестирования

Для тестов была разработана одна тестирующая программа, компилируемая для каждой ОС отдельно. Главной процедуре программы задается приоритет (в Windows RTX нет приоритетов для процессов, только для потоков, в Linux-RT с помощью функции sched\_setscheduler устанавливается алгоритм планирования РВ FIFO и статический приоритет процессу 99) и ей ставится в соответствие первое ядро процессора. В программе создаются три одинаковых независимых потока, в которых запускается одна и та же функция, в которой реализован механизм многократного запуска (10 тыс. циклов) одной из следующих задач:

- задача увеличения значений счетчика от 0 до 100 тыс.;

- задача однократного перемножения двух матриц размером 100x100.

Выбор данных задач обусловлен особенностями моделирования манипулятора и контактного взаимодействия стыковочных интерфейсов, в которых критична скорость выполнения простых арифметических операций. Фактически происходит замер времени выполнения определенных вычислительных операций. Потокам задается максимальный приоритет (в Windows RTX с помощью специализированной функции RtSetThreadPriority потокам присваивается приоритет 127, в Linux-RT потокам присваивается

Таблица 1. Результаты тестирования временных задержек

	DOS,	DOS,	Windows RTX	Linux-RT
	22 6,3	10 2,85		
100x100	23 6,5	5 1,4	10 2,85	17 4,8

Примечание: тест счетчика в ОС Windows RTX и Linux-RT сделать не удалось, так как компилятор настолько оптимизировал исходный код тестовой программы, что задачи выполнялись практически мгновенно (0...100 тактов)

приоритет 99), также осуществляется привязка потоков к отдельным физическим ядрам процессора. В каждом из выполняющихся потоков перед выполнением расчетов выделяется и обнуляется память для массива хранения результатов, которые после выполнения расчетов и замера временных задержек записываются в файлы результатов. Экспериментально было определено, что вывод информации на экран и запись в файл способствуют задержкам выполнения вычислительных операций. Это, возможно, связано с тем, что при операциях ввода/вывода генерируется системный вызов, на который тратится процессорное время, при этом происходит переключение выполняемых задач.

Многопоточность реализована только на ОС Windows RTX, Linux-RT, в остальных ОС выполняется только один поток.

Расчеты модели манипулятора и контактной модели стыковочных интерфейсов будут соответствовать требованиям РВ при соблюдении временных ограничений выполнения арифметических операций. Для оценки таких временных характеристик ОС вводятся понятия временных задержек.

Временная задержка — разница между временем выполнения одной задачи на  $i$ -м цикле и минимальным временем выполнения этой задачи по результатам всех циклов. Величина временных задержек рассчитывается в тактах процессора.

Максимальная временная задержка — разница между максимальным и минимальным временем выполнения одной задачи по результатам всех циклов.

Число циклов запуска задач (10 тыс. ед.) было выбрано опытным путем, так как этого числа циклов достаточно для устойчивого определения максимального и минимального времени выполнения задачи.

Основная причина возникновения временных задержек — скрытые особенности функционирования планировщиков ОС и процессоров. Одним из точных способов измерения времени является использование счетчика TSC (Time Stamp Counter), представляющего собой 64-битный MSR-регистр (Model Specific Register) в составе современных процессоров. Счетчик TSC может быть использован для измерения времени выполнения заданного фрагмента программы с высокой точностью (до 50...100 тактов или 10...20 нс). Для чтения значения счетчика используется ассемблерная команда RDTSC, позволяющая получение значения счетчика в паре регистров EDX: EAX. Данная команда используется для замера времени в ОС Linux RT, MS DOS, Багет. В Windows RTX отсутствует возможность использовать ассемблерные вставки и для замера времени используется специализированная Real-Time API функция RtQueryPerformanceCounter. В тестируемых программах осуществляется жесткая привязка каждого потока к одному из ядер процессора (функция RtSetThreadAffinityMask для Windows RTX, функция CPUSER для Linux-RT).

Значения времени выполнения одного и того же фрагмента кода, получаемые на различных процес-

*То, что сегодня наука, — завтра техника.*

Эдвард Теллер

сорах, могут отличаться из-за различной микроархитектуры, тактовой частоты, объема кэш-памяти процессора, а также из-за работы функций энергосбережения. Поэтому эксперименты выполнялись на одном и том же компьютере с процессором Intel Core i7-2600K (3,40 ГГц, 4x256 КБ+8 Мб, EM64T, GPU) Socket1155 (oem). Так как ОС Багет работает только на IDE-дисковых накопителях, не установленных на аппаратном обеспечении математического стенда, тесты ОС Багет проводились на другом отдельном компьютере. В ОС Windows RTX и Linux-RT все служебные процессы ОС должны быть привязаны к отдельному ядру процессора. В Windows RTX переключение процессов происходит автоматически с помощью настроек утилиты Control Panel (части пакета RTX Runtime). В Linux-RT это происходит с помощью специализированной утилиты cset v.1.5.6.

Наличие пользовательского интерфейса приложения подразумевает обработку ОС сообщений открытых окон, на что тратится процессорное время. Поэтому приложение РВ должно быть скомпилировано как консольное приложение.

#### Результаты тестирования

В процессе тестирования ОСРВ были выявлены следующие особенности ОС:

- наличие и величина временных задержек помимо планировщика ОС также зависят от типа процессора;
- отключение технологии Hyper-Threading в ОС Linux-RT и Windows RTX при загрузке одного потока на одном физическом ядре процессора снижает среднее время выполнения операций примерно в 1,5 раза и величину максимальной временной задержки примерно в 2 раза;
- отключение технологии Hyper-Threading не влияет на величину временных задержек в ОС DOS. Возможно, это связано с тем, что DOS всегда захватывает физическое ядро процессора;
- багет работает только на IDE-дисковых накопителях. Это накладывает ограничения на использование данной ОС в рамках определенной аппаратной структуры;
- среднее время выполнения операции и максимальная временная задержка в ОС DOS и в ОС Багет имеют одинаковый уровень;
- в ОС Багет и в ОС Linux-RT используется AT&T синтаксис ассемблера;
- ассемблерные вставки в Windows RTX не поддерживаются.

Реализация потоков в ОС Windows выполнено в соответствии с Windows API. В ОС Windows процесс является «контейнером для потоков», при этом процесс-контейнер содержит как минимум один поток.

Реализация потоков в ОС Linux выполнена в соответствии с POSIX 1003.b. В ОС Linux каждый поток является процессом, при этом для создания дополнительных потоков используются процессы особого типа — легкие процессы. Эти процессы представляют собой дочерние процессы главного процесса, но при этом разделяют с главным процессом адресное пространство, файловые дескрипторы, обработчики сигналов.

Результаты тестирования ОС представлены в таблице.

При закрытии прерываний в ОС DOS более чем в два раза снижается уровень временных задержек. Это возможно связано с тем, что на обработку прерываний от аппаратуры тратится процессорное время. Эксперименты показали, что максимальная временная задержка при выполнении операции перемножения двух матриц в ОС Windows RTX и Linux-RT меньше, чем в ОС DOS без закрытия прерываний, но больше, чем в ОС DOS с закрытием прерываний.

### Выводы

Проведено тестирование ОС РВ для использования на математическом стенде моделирования космических роботизированных сборочных операций. Проведенные исследования будут актуальными для любых приложений, работающих в режиме жесткого РВ.

Максимальная временная задержка при выполнении операции перемножения двух матриц в ОС Windows RTX ниже, чем в ОС Linux-RT. Учитывая, что Windows RTX является уже настроенным коммерческим продуктом, дальнейшее снижение максимального значения временных задержек маловероятно. Необходимо заметить, что в ОС Linux-RT решающее влияние на временные задержки имеет

настройка опций ядра ОС, поэтому в дальнейшем возможно достижение таких же или даже лучших параметров, чем в ОС Windows RTX.

Наиболее оптимальным вариантом ОС для стенда моделирования космических роботизированных сборочных операций ACM является Linux-RT ввиду следующих преимуществ:

- уровень задержек в ОС Linux-RT сравним с ОС DOS, являющейся однозадачной ОС РВ;

- по сравнению с Windows RTX Linux-RT имеет открытую лицензию;

- Linux-RT работает с аппаратным обеспечением математического стенда ACM (в отличие от, например, ОС Багет);

- Linux-RT позволяет использовать 64-разрядную адресацию памяти, многоядерность процессора, вытесняющую многозадачность, многопоточность, встроенные средства для синхронизации потоков, высокоточного измерения времени и т. д.

### Список литературы

1. Woods D., Kearny M., Crosse D., Massimino M. Space Station Robotics Task Validation and Training // Progress in Astronautics and Aeronautics: Teleoperation and Robotics in Space. Washington: AIAA Inc. 1997. Vol. 161. pp. 475 - 489.
2. Ma O., Buhariwala K., Roger N., MacLean J., Carr R. MDSF — A generic development and simulation facility for flexible, complex robotic systems//Robotica. 1997. Vol. 15. pp. 49-62.
3. Лесков А.Г., Яскевич А.В., Илларионов В.В., Морозкин С.Д., Чернышев И.Е. Математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе причаливания//Электронный инженерный журнал: наука и инновации. МГТУ.
4. Безруков В.Л. и др. Введение в ос2000 // Вопросы кибернетики. М.: НИИСИ РАН. 1999.

*Мирхайдаров Валерий Маратович — инженер программист 2 категории ПАО «РКК «Энергия».*  
 Контактный телефон (495) 513-64-40.  
 E-mail: vmirhaydarov@yandex.ru

### Mitsubishi Electric построит центр для испытаний высоковольтных линий постоянного тока

Корпорация Mitsubishi Electric объявила о своих планах по выходу на глобальный рынок HVDC систем на базе преобразователей напряжения благодаря новому испытательному центру, который будет построен к 2018 г. в Центре передачи и распределения электроэнергии в г. Амагасаки (Япония). К 2020 г. корпорация планирует осуществить поставку нового вида оборудования на сумму более 500 млн. долл. США.

Системы HVDC позволяют снизить объемы выбросов CO<sub>2</sub> за счет эффективной интеграции и увеличения использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия и ветроэнергетика. В системах HVDC-Diamond® будут установлены высоковольтные биполярные транзисторы с изолированным затвором (HVIGBT) производства Mitsubishi Electric.

HVIGBT-транзисторы обладают высоковольтной изоляцией и предназначены для больших номиналов тока, что сокращает стоимость оборудования и его габариты за счет уменьшения числа субмодулей. Возможность параллельного соединения нескольких HVIGBT-транзисторов в каждом из субмодулей позволяет удовлетворять самые высокие требования по пропускной способности, предъявляемые на мировом рынке к системам передачи HVDC на основе преобразователей напряжения.

Еще одна характеристика систем передачи энергии HVDC-Diamond — высокая надежность благодаря использованию высокоскоростных систем управления и защиты. За счет оптимизированных функций управления и подходящей аппаратной конфигурации выполняются требования по обеспечению стабильной и непрерывной работы даже во время сбоев в сети переменного тока, например, при ударе молнии. Быстрореагирующие системы защиты надежно предохраняют все оборудование от воздействия больших токов, генерируемых в момент возникновения неисправности в цепях HVDC системы.

Существует два типа систем передачи энергии HVDC: системы на основе преобразователей с линейной коммутацией (LLC), работающие от внешнего источника питания, и системы на основе преобразователей напряжения, не требующие такого источника. Ожидается, что HVDC системы на основе преобразователей напряжения будут пользоваться более высоким спросом благодаря компактным размерам, достигнутому за счет отдельного управления активной и реактивной мощностью. Данное преимущество позволяет применять такие преобразователи в слабых и нестабильных энергосистемах и устраняет необходимость в дополнительной компенсации реактивной мощности от фильтрокомпенсирующих устройств и другой вспомогательной аппаратуры.

<http://MitsubishiElectric.ru>