



ОАО «СО ЕЭС»



АБС Электро



С.2.1-5. Использование отказоустойчивой распределенной вычислительной системы для целей противоаварийного управления

**А.К. ЛАНДМАН, А.Э. ПЕТРОВ, М.В. ПЕТРУШКОВ, О.О. САКАЕВ,
А.В. СУББОТИН-ЧУКАЛЬСКИЙ**

ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»

Россия

oskar@iaes.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

противоаварийное управление, распределенные вычисления, быстродействие, надежность функционирования, централизованная система противоаварийной автоматики (ЦСПА), POSIX, QNX, VMWare.

1 ВВЕДЕНИЕ

Для широкого спектра задач управления электроэнергетическими объектами характерны необходимость обеспечения бесперебойного функционирования системы управления и высокого быстродействия [1, 2]. В соотношение между этими понятиями вкладывается различный смысл, в зависимости от задачи, решаемой конкретной системой, с учетом иерархии управления.

Рассмотрим предметную область противоаварийного управления (ПАУ) энергосистемой. На верхнем уровне иерархии ПАУ решается задача выбора управляющих воздействий (УВ), которые должны быть реализованы конкретными устройствами на нижнем уровне иерархии, при фиксации на данном уровне аварийных возмущений в энергосистеме, с целью минимизации ущерба от этих возмущений. На сегодняшний день, с учетом развития алгоритмической базы в части применения способа I-ДО [3], выбор управления становится ресурсоемкой математической задачей, максимальная длительность цикла которой ограничивается стандартом [4] не более 30 секунд, при этом на верхнем уровне, как правило, нет необходимости в непосредственной выдаче управляющих сигналов.

В свою очередь, быстродействие реализации управления устройствами нижнего уровня находится в пределах нескольких десятков миллисекунд, с учетом времени срабатывания промежуточных реле. В случае, если устройства нижнего уровня осуществляют собственный цикл выбора управления по способу II-ДО в целях резервирования [5], длительность данного цикла определяется частотой обновления (временем доставки) локальной доаварийной информации, которая нормируется стандартом [4] в пределах 1-2 секунд.

Таким образом, в рамках одной системы управления решаются два класса задач, которые могут быть условно разделены по соотношению параметров быстродействия и надежности на расчетные задачи и задачи реального времени.

Одним из перспективных методов обеспечения надежности и быстродействия при создании систем управления является использование распределенных вычислительных систем (ВС). Это позволяет обеспечить требуемое быстродействие для расчетных задач, за счет

распараллеливания вычислений, и требуемую надежность функционирования для задач реального времени, за счет резервирования.

Работы в данном направлении ведутся при активном участии специалистов ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем» (ИАЭС) с 80-х годов прошлого столетия. Благодаря глубокой теоретической проработке вопросов создания распределенных вычислительных систем управления, в последние годы была разработана универсальная программная платформа для целей противоаварийного управления [6]. Рассмотрим далее опыт адаптации программной платформы к конкретным техническим и программным средствам и опыт внедрения распределенной вычислительной системы, выполняющей функции верхнего уровня ЦСПА, на базе данной платформы.

2 АДАПТАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ЦСПА

2.1 Постановка задачи

ЦСПА ОЭС Сибири включает в себя ПТК верхнего уровня, выбирающий управляющие воздействия (УВ) для аварийных возмущений в сети 220-500 кВ ОЭС Сибири по условиям сохранения статической устойчивости в послеаварийном режиме. Выбор УВ производится по способу I-ДО, по алгоритму, разработанному ЗАО «ИАЭС». Исходными данными для расчета служат математическая модель ОЭС Сибири, а также данные текущего режима, поступающие от ОИК ОДУ Сибири. Управляющие воздействия реализуются низовыми устройствами ЛАПНУ, установленными на объектах ОЭС Сибири, каждое из устройств отвечает за сохранение устойчивости в своем районе управления. Если выбор управления на верхнем уровне по каким-либо причинам в данный момент невозможен (например, из-за ухудшения качества телеинформации), низовые устройства ЛАПНУ автоматически переходят к дозировке УВ, выбранной на основании местной доаварийной информации по способу II-ДО. Взаимодействие между устройствами в рамках ЦСПА налажено на базе открытого стандарта МЭК 60870-5-104.

Предыдущая версия ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири была разработана в 2006-2008 годах и находилась в промышленной эксплуатации с июня 2012 года. В связи с расширением расчетной модели, появлением новых перспективных технологических задач, на которые ПТК не был рассчитан, возникла необходимость в короткие сроки его модернизировать. При этом, модернизированный ПТК верхнего уровня ЦСПА должен был:

- сохранить полную совместимость на уровне взаимодействия с существующими низовыми устройствами ЛАПНУ, какие-либо изменения в низовых устройствах, за исключением изменений настройки, были запрещены;
- обеспечить строго определенное максимальное время расчета одной аварии, согласно стандарту [4] и ГОСТ Р 55105-2012;
- обеспечить возможность распараллеливания расчета управляющих воздействий;
- обеспечить возможность добавления новых районов управления и, соответствующих низовых устройств ЛАПНУ (согласно техническому заданию, должен был быть предусмотрен одновременный расчет до 120 пусковых органов);
- обеспечить возможность замены технических средств без модификации средств программных.

2.2 Выбор технических и программных средств

Для того, чтобы обеспечить максимальную производительность вычислительной системы, а также возможность распараллеливания расчета УВ вплоть до расчета одного пускового органа (ПО) на отдельном процессорном ядре, для развертывания системы Заказчиком были выбраны два сервера IBM x3750 M4, что давало 64 физических ядра на систему в целом, либо 128 логических ядер, при условии включенного механизма гипертрединга (HyperThreading).

Поскольку предыдущая версия программного обеспечения ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири работала под управлением операционной системы (ОС) QNX 4.25, в качестве операционной системы для новой версии была выбрана QNX 6.5, которая:

- обеспечивает поддержку многопроцессорности;
- является POSIX-совместимой ОС, что необходимо для адаптации системообразующих программных модулей универсальной платформы;
- при необходимости, позволяет задействовать механизмы жесткого реального времени (обработчики прерываний) в операциях, критичных по времени выполнения;
- имеет версию КПА.10964-01, которая обладает необходимым сертификатами для использования в автоматизированных системах класса защищенности до 1Б включительно.

Поскольку вычислительная система должна, по возможности, минимально зависеть от используемых технических средств, для упрощения их замены в дальнейшем, было принято решение развернуть систему на виртуальных машинах (ВМ). В качестве среды виртуализации Заказчиком был выбран гипервизор VMWare ESXi версии 5. Хотя ОС QNX 6.5 не тестировалась производителем на совместимость с этим гипервизором, однако натурные испытания показали работоспособность данной версии QNX на ВМ в среде ESXi версии 5. Необходимо отметить, что для полноценной работы стека протоколов TCP/IP с виртуальным сетевым оборудованием VMWare, требуется установить значение минимального размера передаваемого пакета данных (MTU) на стороне QNX не менее 1550 байт. Для сравнения, другой широко известный гипервизор Oracle VM VirtualBox не требует подобных изменений в настройке гостевой ОС QNX.

2.3 Базовые принципы функционирования универсальной программной платформы для создания распределенных вычислительных систем

Рассмотрим базовые принципы функционирования универсальной программной платформы для создания распределенных вычислительных систем, разработанной ЗАО «ИАЭС» [6].

Распределенная вычислительная система (ВС) представляет собой совокупность вычислительных машин (ВМ), или узлов, объединенных сетью передачи данных топологии «шина». Для определения состояния системы в целом в каждый момент времени, необходимо обеспечить ее наблюдаемость, т.е. определение состояния каждого узла системы и своевременную доставку этой информации на все узлы. С этой целью, реализована шина данных, в которую каждый узел системы периодически отправляет сообщение, однозначно определяющее текущее состояние узла, и откуда, в свою очередь, каждый узел получает слова состояния остальных узлов. Каждый узел из полученных им сообщений формирует у себя общее слово состояния системы. Таким образом, каждый узел независимо наблюдает и оценивает текущее состояние децентрализованной системы. Обмен состояниями узлов (и другими сообщениями, к которым могут быть предъявлены схожие требования) организован на базе групповой (multicast) рассылки UDP-сообщений, с использованием принципов, определенных стандартом МЭК 61850 (в части GOOSE-сообщений).

Функции запуска, останова, контроля состояния задач, запускаемых на конкретном узле распределенной ВС, возлагаются на этот же узел. Однако, для принятия решения о том, какие задачи должны быть запущены на конкретном узле в данный момент времени, следует учитывать состояние системы в целом. Информации, получаемой каждым узлом, достаточно для децентрализованного принятия решений о состоянии системы, однако для снижения затрат времени, функция определения состояния ВС выделяется на отдельный узел, называемый арбитром системы. Арбитр, на основании текущей информации о состоянии системы, дает команды узлам на запуск и останов процессов. Функция арбитра является переходящей, текущий узел-арбитр определяется в результате выборов, проводимых с заданной периодичностью.

В случае выхода из строя одного из узлов распределенной ВС, либо останова узла для проведения регламентных работ, либо при нарушении физической связи с данным узлом необходимо передать все его функции другому узлу, с целью резервирования. Для того, чтобы обеспечить передачу функций (миграцию задач), в конфигурации системы описывается, на

каких узлах каждая задача может запускаться, в какой последовательности (задающей приоритет узлов, с точки зрения выполнения данной функции), а также количество одновременно запущенных в системе экземпляров данной задачи.

Обмен данными между узлами распределенной ВС также организован на базе групповой рассылки UDP-пакетов, с использованием специально разработанного механизма подписок на данные, позволяющего сконфигурировать первоначальную загрузку всех необходимых данных на узел (по старту узла), периодическое обновление необходимых исходных данных на узле, сбор всех таблиц данных системы на определенном узле с целью архивирования, обмен сообщениями произвольного размера и т.п.

С точки зрения среды виртуализации, все ВМ распределенной ВС равноправны. Средствами гипервизора должны настраиваться параметры, определяемые функциями, возложенными на конкретную ВМ, т.е. виртуальное сетевое оборудование, последовательность запуска ВМ, выделение процессорных ядер каждой ВМ.

2.4 Выбор структуры распределенной вычислительной системы

При разработке распределенной ВС, решающей расчетные задачи на верхнем уровне иерархии управления (например, ПТК верхнего уровня ЦСПА), целесообразно выделить следующие функции:

- Ввод и подготовка исходных данных для расчета.
- Расчет.
- Сборка результатов расчета с расчетных ВМ.
- Взаимодействие с системами управления нижнего уровня.
- Взаимодействие с автоматизированным рабочим местом (АРМ) пользователя.
- Взаимодействие с внешними системами управления и мониторинга (АСУТП и пр.)

Функция расчета может быть разделена между несколькими узлами по определенным критериям, с целью одновременного выполнения расчетных задач для однотипных элементов управляемого объекта для обеспечения требуемого быстродействия. Функции, касающиеся обмена информацией с внешними системами целесообразно объединять на одном узле, в терминах систем сбора и передачи информации называемом предвключенной ВМ. Согласно требованиям стандарта [4], все функции, выполняемые ВС, должны быть резервированы.

С учетом вышеизложенного, при проектировании распределенной ВС ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири, была принята структура с горячим резервированием основных функций (рис 1). Первоначально к реализации был рекомендован вариант распределения ВМ по физическим серверам, ориентированный на компромисс между производительностью и надежностью (рис 2). В этом варианте, ВМ, выполняющие роль резервных, не несут на себе никаких технологических функций, что позволило бы высвободить процессорные ядра для ВМ, выполняющих роль основных. При отключении одного из физических серверов, технологические задачи выбора УВ полностью мигрируют на другой, пропорционально увеличивая нагрузку на процессорные ядра.

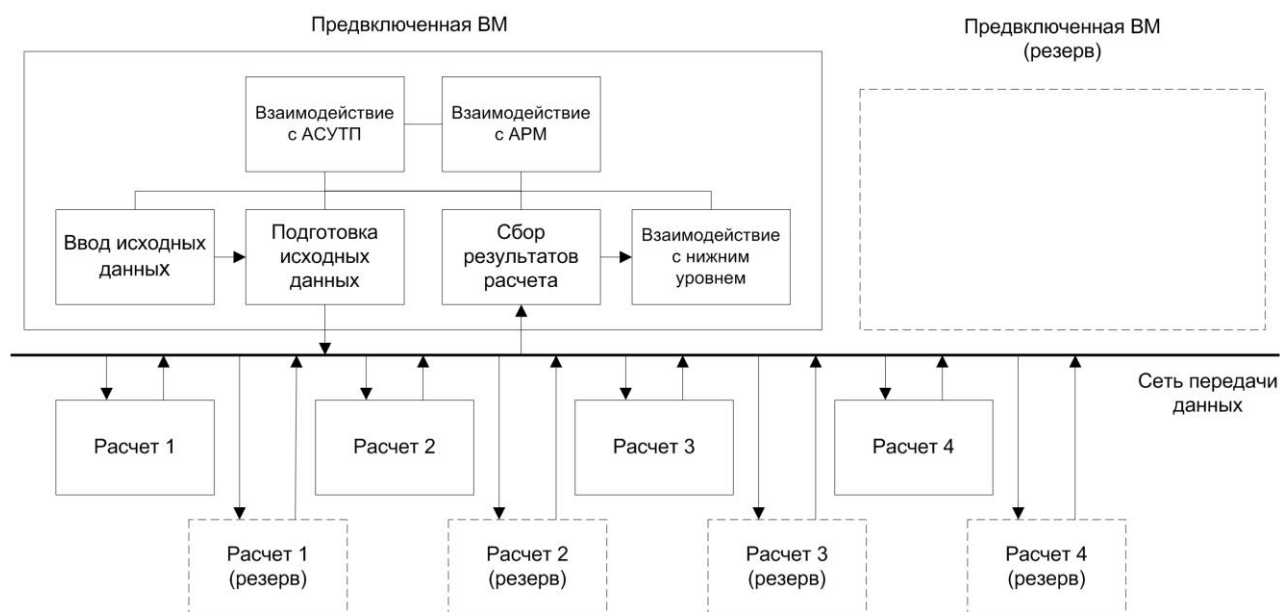


Рис. 1: Структура распределенной ВС для выполнения функций верхнего уровня ЦСПА

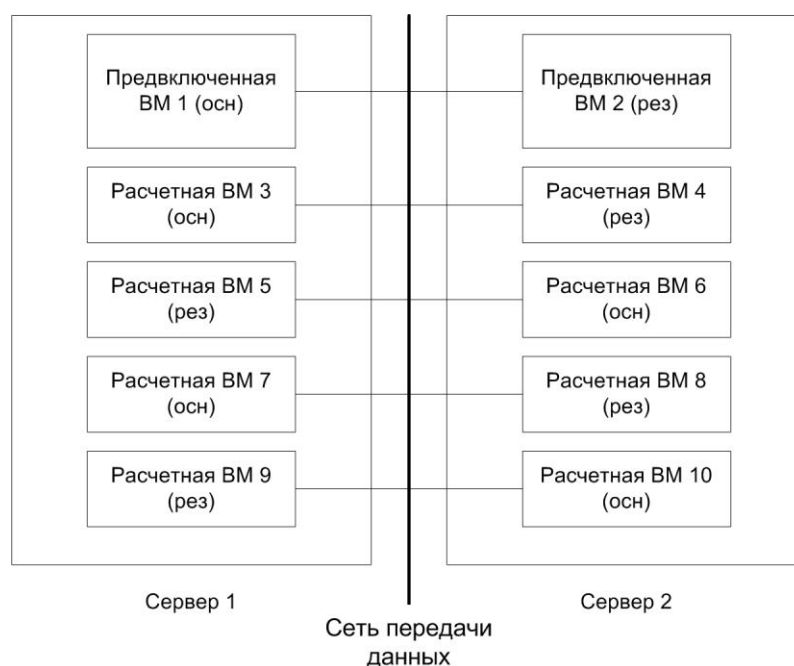


Рис. 2: Распределение ВМ по физическим серверам для обеспечения надежности функционирования

Однако от данного подхода пришлось отказаться, поскольку в процессе развертывания и пусконаладки распределенной ВС в гипервизоре VMWare выяснилось, что, во-первых, в стандартном микроядре QNX 6.5 существуют определенные проблемы с поддержкой более 16 процессорных ядер; во-вторых, выделение большого количества процессорных ядер одной ВМ выводит ее за пределы NUMA-узла, что резко снижает быстродействие данной ВМ и системы в целом.

Поддержку необходимого (до 32) количества процессорных ядер удалось настроить благодаря своевременной помощи специалистов СВД Софтвр, компании, осуществляющей поставки QNX на территории России и поддержку QNX, включая разработку драйверов для современных технических средств. Суть же второго ограничения требует пояснений.

NUMA (Non-Uniform Memory Access — «неравномерный доступ к памяти» или Non-Uniform Memory Architecture — «Архитектура с неравномерной памятью») — схема

реализации компьютерной памяти, используемая в мультипроцессорных системах, когда время доступа к памяти определяется её расположением по отношению к процессору. Традиционную многопроцессорную архитектуру (Symmetric Multi-Processor, SMP) характеризует общая шина памяти между всеми физическими процессорами и оперативной памятью. NUMA, в отличие от SMP, выделяет каждому процессору «свою» память. Такие ячейки (процессор+память) называются узлами, или нодами (NUMA Node). Для взаимодействия между этими нодами, т.е. для обращения процессора к «чужой» для него памяти, используется быстрая шина [7]. К преимуществам NUMA относится, прежде всего, высокое быстродействие в пределах NUMA-узла, к недостаткам, с которыми мы столкнулись на практике – значительное снижение быстродействия при обращениях к памяти за пределами NUMA-узла.

Поскольку серверы в конфигурации, предоставленной Заказчиком, были оснащены четырьмя физическими процессорными гнездами (сокетам), то и число доступных NUMA-узлов составляло 4, причем каждая ВМ в системе должна была укладываться в пределы одного NUMA-узла. Таким образом, расчетным ВМ было выделено по 12 логических процессорных ядер, чего, в свою очередь, было недостаточно для выделения отдельного ядра под расчет каждой из аварий. С другой стороны, в системе имелись резервные ВМ, чьи мощности не были задействованы для расчета.

В связи с этим, распределенная ВС ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири была сконфигурирована и введена в строй в варианте распределения ВМ по физическим серверам, обеспечивающем загрузку максимального количества процессорных ядер при сохранении допустимой надежности (рис 3).

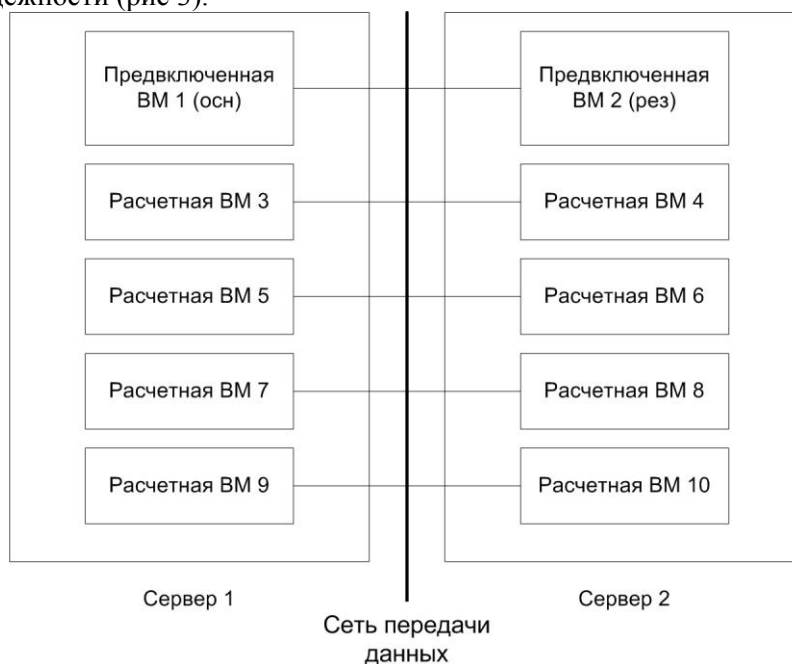


Рис. 3: Распределение ВМ по физическим серверам для обеспечения максимальной производительности, при сохранении допустимой надежности

Такая структура не предусматривает расчетных ВМ, находящихся в горячем резерве, все ВМ должны быть загружены расчетными задачами. При этом, все ВМ попарно резервируют друг друга таким образом, что при выходе из строя одной ВМ, например, ВМ 3, на ВМ 4 запускается расчет пусковых органов, которые ранее рассчитывались на ВМ 3, и наоборот. Таким образом, при отключении одного физического сервера, нагрузка на расчетные ВМ сервера, оставшегося в работе, удваивается, за счет резервирования расчета аварий, по умолчанию назначенных на ВМ сервера, выведенного из работы. Следовательно, увеличивается и время расчета каждой аварии.

В процессе пусконаладочных работ распределенная ВС была развернута на полигонных серверах, затем была перенесена на серверы, предназначенные к вводу в эксплуатацию. Таким образом, была проверена переносимость системы при замене технических средств. Необходимо

отметить, что процедура миграции виртуальных машин была проведена специалистами Заказчика.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

30.01.2015 модифицированный программно-технический комплекс верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири на базе универсальной программной платформы для создания распределенных ВС производства ЗАО «ИАЭС» введен в промышленную эксплуатацию в филиале ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири (г. Кемерово). Сейчас в составе ЦСПА ОЭС Сибири функционируют три низовых ЛАПНУ, расположенные на ПС 1150 кВ Алтай, ПС 500 кВ Таврическая и ПС 1150 кВ Итатская, для этих ЛАПНУ рассчитывается порядка 30 пусковых органов. В ближайшее время планируется подключение ЛАПНУ ПС 500 кВ Озерная, ПС 500 кВ Камала, Богучанской ГЭС и Саяно-Шушенской ГЭС.

Успешный опыт адаптации универсальной программной платформы к выполнению функций ЦСПА подтверждает ее заявленные характеристики [6], а именно:

- Минимальная зависимость платформы от используемой операционной системы.
- Возможность широкого использования средств виртуализации.
- Масштабируемость и переносимость платформы, в части замены аппаратных средств.
- Возможность адаптации платформы на устройства различных уровней иерархии противоаварийного управления.
- Возможность создания гетерогенных ВС.

Опыт внедрения универсальной платформы показал правильность принятых подходов и перспективность теоретических и практических разработок ЗАО «ИАЭС» в части создания распределенных ВС для целей противоаварийного управления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Ф. Задорожный, М.С. Тарков, О.В. Захаркин, А.М. Петров, А.Э. Петров, О.О. Сакаев. Программное обеспечение отказоустойчивых распределенных вычислительных систем для управления электроэнергетическими системами. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – Спецвыпуск. – №1. – С.155-160.
- [2] А.К. Ландман, А.М. Петров, А.Э. Петров, О.О. Сакаев, А.Ф. Задорожный, М.С. Тарков. Использование отказоустойчивых распределенных вычислительных систем для управления электроэнергетическими системами. // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – СПб, 2011.
- [3] А.К. Ландман, А.Э. Петров, А.С. Вторушин, Е.Ю. Попова, С.Г. Аржанников. Перспективы совершенствования алгоритмов централизованной противоаварийной автоматики. // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013.
- [4] СТО 59012820.29.240.001-2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. М., 2011.
- [5] А.К. Ландман, А.М. Петров, А.Э. Петров, О.О. Сакаев. Разработка интегрированной системы ПА ОЭС Сибири. // Релейная защита и автоматика энергосистем 2010. Сборник докладов XX конференции (Москва, 1-4 июня 2010). - М., «Научно-инженерное информационное агентство», 2010. – С. 52-59.
- [6] А.К. Ландман, А.Э. Петров, О.О. Сакаев, М.В. Петрушков, А.В. Субботин-Чукальский. Подходы к разработке отказоустойчивой распределенной вычислительной системы для целей противоаварийного управления. // Релейная защита и автоматика энергосистем 2014. Сборник докладов XXII конференции (Москва, 27-29 мая 2014). - М., 2014. – ISBN 978-5-9903581-4-0. - С. 279-285.
- [7] Using NUMA Systems with ESXi. // VMware vSphere 5.5 Documentation Center. – © VMware, 2014. - <https://pubs.vmware.com/vsphere-55/topic/com.vmware.vsphere.resmgmt.doc/GUID-7E0C6311-5B27-408E-8F51-E4F1FC997283.html>