

## СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА\*

О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин (ИДСТУ СО РАН)

*Рассмотрена система имитационного моделирования динамики состояния сложных технических систем, имеющих в своем составе уникальные механические системы. Представлена модель агента, классы состояний, отражающие стадии (этапы) процесса изменения технического состояния: от состояния исходной дефектности до отказа. Моделирование динамики основано на применении логико-математической модели, объединяющей экспертные знания и аналитические модели для реализации поведения агентов. Результаты имитационного моделирования являются основой поддержки принятия решений при обеспечении безопасности на всех стадиях жизненного цикла промышленных объектов.*

*Ключевые слова: автоматизация исследования безопасности, сложная техническая система, уникальная механическая система, агентное моделирование, продукции, прецеденты.*

Отказы сложных технических систем (СТС), используемых для реализации опасных процессов при экстремальных значениях параметров взрывопожароопасных и токсичных сред, являются источником техногенных чрезвычайных ситуаций. Социальные, экономические и экологические последствия подобных техногенных чрезвычайных ситуаций обуславливают необходимость совершенствования научных основ обеспечения техногенной безопасности. Значительное число отказов СТС и последующих за этим аварий обусловлено отказами уникальных механических систем, входящих в состав СТС. Под уникальными механическими системами понимаются системы, изготавливаемые в 1...5 экземплярах, эксплуатируемые в отличающихся условиях и реализующие экстремальные технологические операции в составе СТС. Отказы уникальных механических систем обусловлены процессами деградации их свойств до такой степени, когда уникальные механические системы перестают выполнять возложенные на них функции, в частности, обеспечение безопасности.

Предотвращение аварий технических систем связано с задачей понижения возможности отказов уникальных механических систем, которая, в свою очередь, в значительной степени зависит от прогнозирования динамики их технического состояния. Последняя определяется факторами, обуславливающими протекание деградационных процессов в элементах уникальных механических систем. Под деградационным понимается механо-физико-химический процесс, протекающий в материале детали, обуславливающий одновременное изменение технического состояния элементов иерархии: "деталь — сборочная единица — механическая система — техническая система", и приводящий к прекращению функционирования и/или нарушению безопасности эксплуатации системы [1, 2].

Применение современных технологий имитационного моделирования является одним из эффективных способов решения задачи прогнозирования и исследования, в том числе технического состояния СТС. Сложная техническая система — это объект со сложной структурой, и его состояние складывается

из состояний большого числа разнотипных элементов, поэтому для моделирования динамики технического состояния сложной системы целесообразно использовать агентное моделирование, позволяющее исследовать поведение объектов, содержащих большое число подсистем и обладающих индивидуальным поведением [3, 4].

Для рассматриваемой проблемы очень важным преимуществом агентного моделирования является то, что, в отличие от моделей системной динамики или дискретно-событийных моделей, здесь нет необходимости подробно определять поведение системы в целом, разработка модели возможна при отсутствии глубоких знаний о глобальных зависимостях. Агентную модель можно построить, опираясь на знания об индивидуальной логике поведения объектов. А информацию об особенностях динамики системы в целом можно вывести из результатов исследования поведения модели. Агентную модель проще поддерживать: уточнения обычно делаются на локальном уровне и не требуют глобальных изменений [3].

Другой особенностью исследования состояний СТС, обусловленных отказами уникальных механических систем, является отсутствие статистической информации о динамике изменения технического состояния, что влечет необходимость использования методов искусственного интеллекта, в частности, экспертных систем.

В данной работе представлена интеллектуальная агентная модель и система, реализующие имитационное моделирование процесса исследования и обеспечения безопасности на примере оборудования нефтехимического производства полиэтилена низкой плотности при сверхвысоком давлении.

Представим СТС (производство полиэтилена) в виде иерархии элементов (рис. 1). Каждому структурному элементу соответствует агент модели. Агент имеет описание структуры своих состояний, алгоритм идентификации состояний и информационно-логико-математическое обеспечение в виде БД, экспертных систем [5, 6] и математических модулей.

Структуру состояний описывает схема на рис. 2 [1]. Состояния рассматриваются на различных информа-

\* Работа выполнена по междисциплинарному интеграционному проекту СО РАН №116.

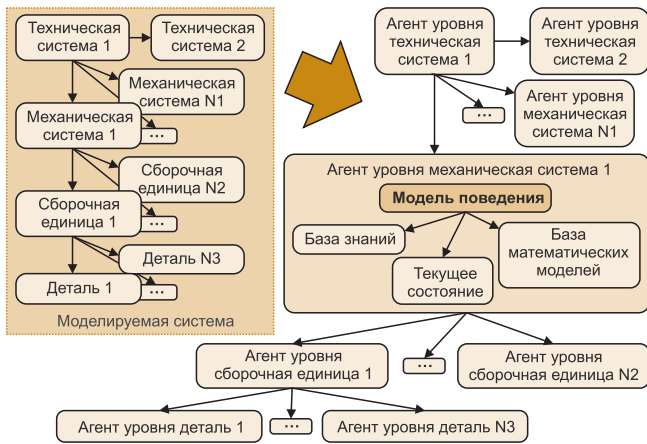


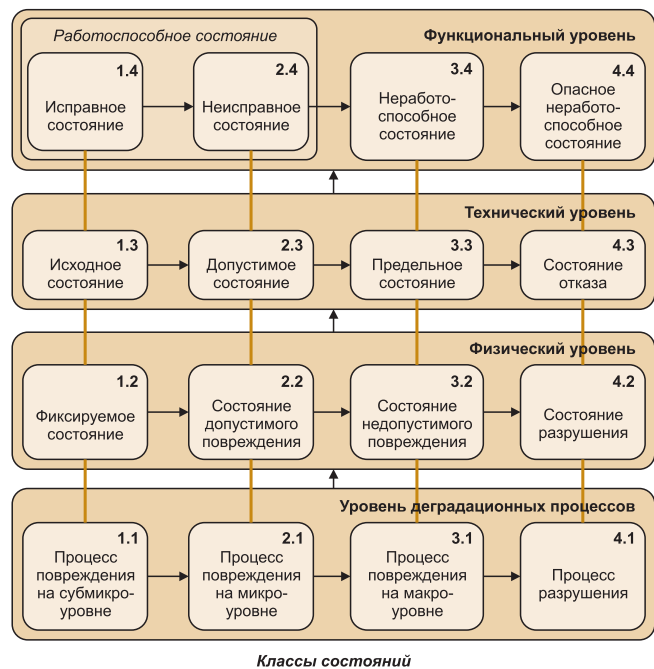
Рис. 1. Представление технической системы в виде иерархии агентов

ционных уровнях с точки зрения функционирования (исправен/неисправен), технического состояния (описание параметров согласно техническим требованиям), физического состояния (описание механо-физико-химических параметров деградационных процессов) и самих деградационных процессов (их механизм как сочетание воздействующих факторов и свойств исследуемого объекта, и кинетика как последовательность событий развития процесса). На информационных уровнях выделены классы состояний. Каждый класс описывает непрерывную динамику технического состояния. Переходы между классами описывают дискретную составляющую, которая отражает скачкообразный переход состояния из одного класса в другой, когда кардинально могут изменяться как значения параметров состояния, так и их множество.

Непрерывная динамика описывается на основе математических/эмпирических моделей, а дискретная – на основе знаний. Знания отражают накопленный опыт в виде описаний имевших место отказов и аварий, теоретических знаний, описывающих деградационные процессы и закономерности их протекания, и знаний экспертов-специалистов в области структурной и прочностной надежности и безопасности техногенных объектов.

Алгоритм имитационного моделирования представляет собой последовательное исследование каждого класса состояний на всех информационных уровнях, начиная с уровня деградационных процессов и заканчивая функциональным уровнем. При исследовании класса состояний на вход поступают исходные данные о свойствах объекта, воздействующих факторах и результаты предыдущих этапов исследования, на выходе определяются параметры технического состояния. Задача определения параметров решается на основе комплексного использования прецедентной и продукционной экспертных систем и библиотеки математических моделей.

На каждом шаге имитационного моделирования, соответствующем одному такту модельного времени, имеется очередь агентов, формирующая план вычис-



Классы состояний

Рис. 2. Классы состояний механической системы и ее элементов

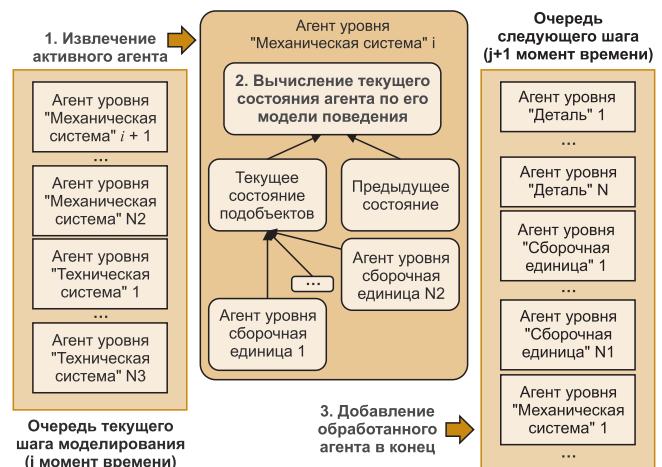


Рис. 3. Алгоритм моделирования за один такт моделирования

ления. Объекты данной очереди расположены в соответствии со структурной иерархией (от детали до технической системы). В начале очереди помещаются агенты, которые не имеют составных частей. В рассматриваемом примере – это детали. В конце очереди находятся агенты, не входящие в состав других агентов. В примере – это техническая система. Процесс вычисления движется в направлении от простых агентов (агенты деталей) к составным (агенты технических систем). Согласно очереди, на каждом шаге моделирования будет происходить вычисление текущего (нового) состояния каждого агента модели. Алгоритм отдельного шага имитационного моделирования состоит из трех этапов (рис. 3).

1. Активация агента, находящегося на первой позиции очереди текущего шага моделирования, с последующим его удалением из этой очереди.

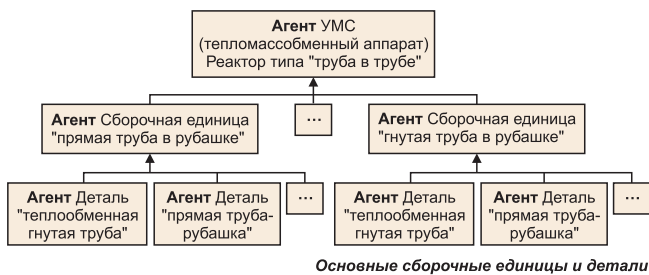


Рис. 4. Структура агентной модели реактора типа "труба в трубе"

2. Получение активированным агентом управления и осуществление им вычисления своего нового состояния в соответствии с моделью поведения и текущим состоянием агентов, отвечающих за поведение его составных элементов. Например, состояние агента механической системы вычисляется на основе информации о текущем состоянии всех подобъектов (сборочных единиц, входящих в ее состав) и собственного состояния на предыдущем шаге.

3. Деактивация агента и добавление его в формируемую очередь следующего шага моделирования.

Предложенный подход реализован в системе имитационного моделирования динамики состояний СТС.

Основными функциями системы являются:

- ввод, хранение и управление данными;
- задание структуры и логики модели;
- планирование и запуск экспериментов;
- имитационное моделирование;
- визуализация, контроль структуры, логики модели, входных данных и динамики прогона модели;
- мониторинг модели и формирование промежуточных и конечных результатов.

Рассмотрим в качестве объекта исследования уникальную механическую систему "трубчатый реактор", являющуюся компонентом "Производства полиэтилена низкой плотности" и выполняющую функцию обеспечения теплообмена при высоком давлении рабочей среды трубного пространства и контактирующей среды в межтрубном пространстве (в рубашке).

Основными составными частями уникальной механической системы являются сборочные единицы "гну́тая труба в рубашке" и "прямая труба в рубашке". В свою очередь, составной частью каждой сборочной единицы является деталь "теплообменная гнутая труба" или "теплообменная прямая труба". В межтрубном пространстве циркулирует теплообменная среда (механически и химически очищенная вода при давлении 3...4 МПа и температуре 290...300°C), в толстостенной трубе перемещается взрывопожароопасный газ (давление до 250 МПа, температура 290...300°C) и продукт полимеризации этого газа (полиэтилен).

Подобные параметры процесса и перерабатываемые вещества характеризуются как опасные и позволяют классифицировать объект как опасный.

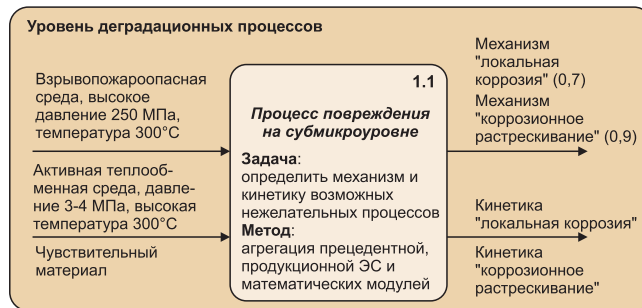


Рис. 5. Схема работы блока 1.1 модели при вычислении текущего состояния агента Детали

Для данного опасного объекта детализируем имитационную модель изменения его технического состояния во времени (рис. 4). В рассматриваемом примере интервал модельного времени – [0, 26 000 ч], шаг – 10 ч. При запуске процесса моделирования агенты уровня "Деталь" находятся на уровне нежелательных процессов, в первом подпространстве состояний "процессов повреждения на субмикроуровне", блок 1.1. С учетом входов системы, характеризующих параметры среды, нагрузки и свойств объекта, описывающих материал, на основе агрегации методов продукционной и прецедентной экспертной системы осуществляется вывод о механизмах и кинетике возможных нежелательных (деградационных) процессов (рис. 5).

В рассматриваемом случае механизм и кинетика деградационного процесса определен на основании знаний продукционной экспертной системы [2]:

**ЕСЛИ** значительные растягивающие напряжения ( $\sigma_{\text{раст}} \leq 0,7\sigma_{0,2}$ ), в том числе остаточные **И** чувствительный материал (деформация низколегированной стали в холодном состоянии величиной до 5%), **И** активная контактная среда (вода под давлением 3...4 МПа и температуре около 300°C), **ТО** механизм "локальная коррозия" (Коэффициент уверенности (КУ) = 0,8) **ИЛИ** механизм "коррозионное растрескивание" (КУ = 0,9);

**ЕСЛИ** механизм "коррозионное растрескивание", **ТО** поглощение в субмикрообъемах материала энергии остаточных напряжений и внешнего механического воздействия **И** повышение энергии кри-

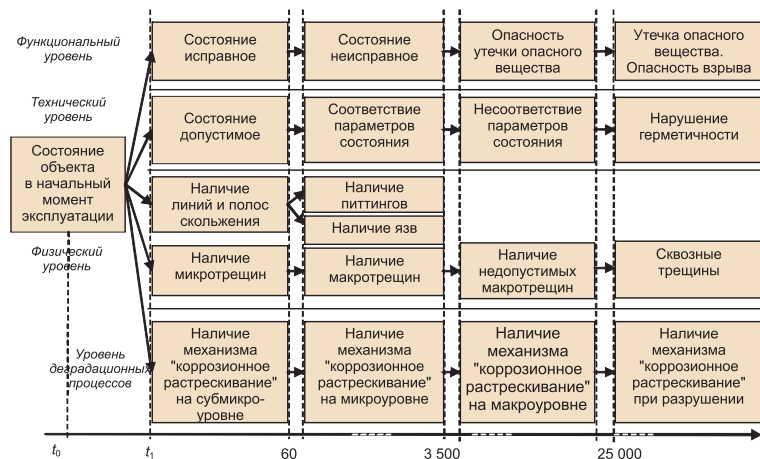


Рис. 6. Результаты моделирования в виде дерева состояний

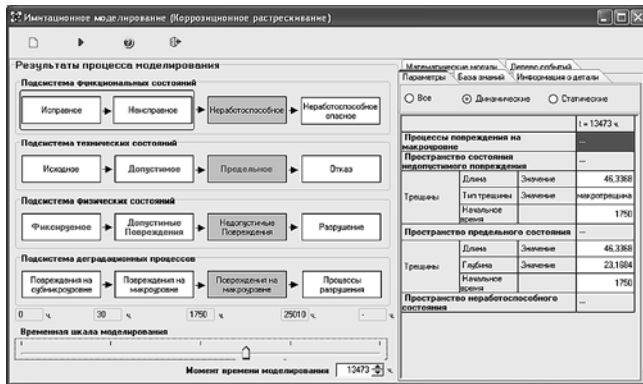


Рис. 7. Результаты моделирования.  
Параметры состояния детали  
в заданный момент моделирования

таллической решетки до критического уровня, **И** деформация кристаллической решетки, **И** разрыв межзатомных связей.

Далее осуществляется переход на следующий информационный уровень (физический уровень) в подпространство "фиксируемых состояний", блок 1.2, где результатом моделирования являются параметры состояний на физическом уровне.

Параметры определены на основании следующих знаний:

**ЕСЛИ** кинетика "коррозионного расстрескивания" на субмикроруровне, **ТО** линии и полосы скольжения (местоположение — на поверхности) **И** трещины (местоположение — на поверхности; длина < 100 мкм).

Аналогичные переходы осуществляются по всем информационным уровням, блоки 1.3, 1.4. Итогом моделирования является множество параметров, описывающих техническое состояние во всех аспектах (рис. 6, первый уровень дерева).

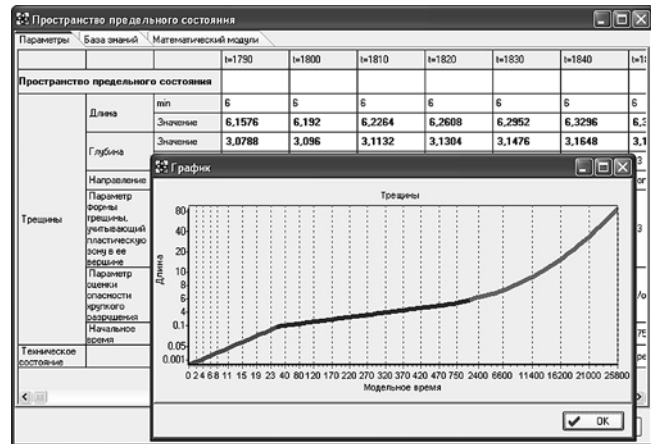


Рис. 8. Результаты моделирования.  
Параметры пространства предельного  
состояния и их значения в каждый момент моделирования

Затем для каждого момента моделирования осуществляется вычисление значений параметров по аналитическим зависимостям, выявленным на предыдущем этапе, в частности, определяется длина макротрещины и момент времени, когда значение выйдет за пределы рассматриваемого пространства. Длина макротрещины в каждый момент модельного времени определяется по экспериментальной модели.

В особый момент, когда параметр длины трещины вышел за границу класса состояний, осуществляется переход в следующий класс, характеризующейся большей опасностью, то есть рассматриваются состояния процессов повреждения на микроуровне и все соответствующие им классы состояний (рис. 2, блоки 2.1-2.4). Далее процесс моделирования аналогичен. Результат моделирования — это дерево состояний (рис. 6), где каждая вершина дерева описывается

### В целях поддержки виртуализации и облачных вычислений Cisco повысила архитектурную гибкость ЦОД

Cisco объявила о создании новой технологии, развивающей стратегию Cisco Data Center 3.0 и помогающей заказчикам повышать гибкость центров обработки данных (ЦОД), где все шире применяются решения для виртуализации и облачных вычислений. Эта технология расширяет возможности унифицированной матрицы коммутации Cisco, повышающей эффективность доставки информации в физических и виртуализированных ЦОД, а также эффективность управления частными и публичными облачными ресурсами. Новая технология — Cisco FabricPath® резко увеличивает масштабируемость сетей, гибкость ресурсов, эффективность активов и производительность ЦОД.

Кроме того, Cisco объявила новые усовершенствования в коммутаторах ЦОД Cisco Nexus® и Catalyst®, дополнительные расширения услуг Cisco WAAS (Wide Area Application Services) и новые сервисы Cisco.

#### Масштабируемость ЦОД, распределение ресурсов и производительность

Технология Cisco FabricPath стала частью NX-OS — ОС Cisco для центров обработки данных. Cisco FabricPath реша-

ет новые проблемы ЦОД и облачных вычислений, возникающие из-за сложных требований виртуализации, мобильного и динамичного распределения рабочих нагрузок и формирования облачной прикладной среды для высокопроизводительных вычислений. Технология Cisco FabricPath, основанная на новом стандарте TRILL (Transparent Interconnection of Lots of Links), поддерживает небывало высокую масштабируемость, надежность и производительность ЦОД.

Модуль ввода/вывода Cisco Nexus 7000 F-series (новый модуль для коммутаторов ЦОД Cisco Nexus 7000) поддерживает качественно новый уровень производительности с помощью 32 портов 10 Gigabit Ethernet и отличается низкой латентностью, пониженным энергопотреблением и ускоренной окупаемостью. Этот модуль, разработанный для уровней доступа и агрегации, коммутирует трафик со скоростью до 320 Гбит/с и обеспечивает одновременную поддержку соединений Gigabit Ethernet и 10 Gigabit Ethernet, создавая возможность модернизации и защиты инвестиций в существующие технологии. Cisco Nexus 7000 F-series поддерживает спецификации Data Center Bridging, TRILL и

множеством параметров и их значений в каждый модельный момент времени (рис. 7, 8).

В результате работы системы моделирования предложен набор управляющих действий для уникальных механических систем, обеспечивающий:

- диагностирование теплообменных гнутых труб реактора один раз в 2,5 года;
- контроль за наличием взрывопожароопасного газа в теплообменной среде.

#### Заключение

Представлен детерминированный подход к прогнозированию технического состояния. Отказ рассмотрен не как случайное событие, для которого осуществляется оценка вероятности наступления, а как процесс, обусловленный деградацией уникальных механических систем. Подробное описание данного процесса обеспечивает возможность получения более точных результатов прогнозирования динамики технического состояния.

Имитационное моделирование технического состояния механических систем необходимо использовать на этапе проектирования для выявления возможных деградационных процессов, обоснования наиболее подходящего материала и его структуры, формирования критериев предельного состояния, методов, средств и периодичности диагностирования. На этапе эксплуатации модель должна использоваться для определения остаточного ресурса и обоснования периодичности технического обслужи-

вания и ремонта. Результаты имитационного моделирования могут быть использованы и для задач анализа и оценки риска аварийных ситуаций и аварий.

#### Список литературы

1. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. №1.
2. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. №3.
3. Борщев А. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. // Gpss.ru – сайт, посвященный проблемам имитационного моделирования. URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>
4. Медведев В.В., Половинкин В.Н. Использование имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых двигателей // Материалы IV всероссийской научно-практич. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2009). С.-Петербург. 2009. В 2 т. Т.2.
5. Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Компонентный подход: модуль производственной экспертной системы. // Тр. междуна. научно-технич. конф. "Интеллектуальные системы" (AIS'08) и "Интеллектуальные САПР" (CAD-2008), Дивноморское. 2008. М.: Физматлит, 2008. Т.2.
6. Павлов А.И., Юрин А.Ю. Компонентный подход: модуль правдоподобного вывода по прецедентам // Программные продукты и системы. 2008. №3.

*Николайчук Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
Павлов Александр Иннокентьевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
Юрин Александр Юрьевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник  
Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН).*

*Контактные телефоны: (3952) 45-31-57, 45-30-19. E-mail: nikoly@icc.ru asd@icc.ru iskander@icc.ru*

Fibre Channel over Ethernet (FCoE), реализуемые с помощью простого обновления ПО.

Система коммутации Cisco FabricPath Switching System (FSS) – интегрированная, проверенная аппаратно-программная система, поддерживающая функциональность FabricPath и позволяющая строить отлично масштабируемые домены. Система основана на программной функции FabricPath, встроенной в ОС NX-OS, и аппаратных средствах, поддерживающих функциональность FabricPath (имеются в виду коммутаторы Nexus 7000 с модулями ввода/вывода F-Series).

#### Оптимизация производительности приложений

Решение Cisco WAAS ускоряет передачу трафика по глобальным сетям, давая предприятиям возможность консолидировать приложения в центрах обработки данных и использовать облачные вычисления, гарантируя высокую производительность для удаленных и мобильных сотрудников.

Cisco WAAS можно устанавливать в отделениях компании как услугу "по требованию" с помощью маршрутизаторов интегрированных услуг Cisco ISR G2. В результате повышается гибкость бизнеса и резко упрощаются деловые операции.

Новая версия Cisco WAAS 4.2 оптимизирует производительность Web-приложений, установленных в ЦОД, предоставляемых по хостингу через сетевое облако или доставляемых как услуга (SaaS).

Cisco WAAS 4.2 лучше поддерживает технологию Windows-server-on-WAAS (WoW), ускоряя доступ к приложениям ЦОД, облачным вычислениям и локальным Windows-сервисам на единой платформе.

WAAS Mobile 3.5 для облачных вычислений легко устанавливается в инфраструктуре публичного облака и увеличивает производительность приложений для мобильных пользователей.

#### Высокопроизводительная коммутация для ЦОД

Развивая успех коммутаторов серии Cisco Catalyst 4900 (число проданных портов на коммутаторах этой серии превысило 10 млн. ед.), Cisco анонсировала коммутатор 4948E с повышенной емкостью, великолепной производительностью, защитой от микропиков для стабилизации латентности, автоматизацией и прозрачностью. При этом коммутатор поддерживает неблокирующую коммутацию в среде IPv6, автоматическое выделение ресурсов и умные функции домашних вызовов.

[Http://www.cisco.ru](http://www.cisco.ru)