

УДК 519.873

О.Н. ОДАРУЩЕНКО¹, С.В. ЖИВИЛО¹, В.С. ХАРЧЕНКО², Е.Б. ОДАРУЩЕНКО¹¹Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Украина²Национальный аэрокосмический университет им. М.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СЕРВЕРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотрены архитектурные решения современных отказоустойчивых серверных систем (Fault Tolerance Server – FT - сервера). Определено множество возможных дефектов и отказов таких систем. Дефекты и отказы проклассифицированы на основе выработанного набора признаков. Проведен анализ классификаций отказоустойчивых компьютерных систем (ОКС). Выполнена классификация ОКС по признакам: область применения ОКС и интенсивности функциональной нагрузки на ОКС. Произведен анализ дефектов FT-серверов. Выполнен анализ отказов FT-серверов. Сформирована таблица зависимости их дефектов и отказов.

Ключевые слова: сервер, аппаратная архитектура, отказоустойчивая компьютерная система.

Введение

Современный уровень информационного прогресса человечества требует построения высоконадёжных и высокопроизводительных компьютерных систем различной архитектуры.

Особенно данная потребность ощущается в связи с отказом от множества сервисов локальных рабочих станций и использованием облачных технологий (Cloud-компьютинг).

Их применение дает возможность быстро создавать и масштабировать приложения. Работа этих приложений не требует создания собственного центра обработки данных (ЦОД).

При этом ЦОД, построенный провайдером информационных сервисов, дешевле. Использование потребителем услуг облачных вычислений создает условия, позволяющие не создавать собственные дорогостоящие ЦОД.

При этом к ЦОД провайдера предъявляются повышенные требования к надежности функционирования и информационной безопасности.

В связи с этим актуальным является решение задачи оценки надежности отказоустойчивых компьютерных систем, представляющих собой современные серверные решения, для выработки рекомендаций по архитектурным решениям ЦОД.

Для решения задачи оценки надежности в статье выполнен анализ современных серверных архитектур построения высоконадёжных и высокопроизводительных, масштабируемых систем ведущих мировых производителей. Проанализирован возможный базовый набор дефектов и типовых отказов исследуемых систем.

1. Анализ классификаций отказоустойчивых компьютерных систем

Анализ литературных источников [1 – 3] показал, что исторически сложилось несколько классификаций отказоустойчивых компьютерных систем (ОКС).

Первая классификация высокопроизводительных компьютерных систем была предложена М. Флином в 1966. В ее основе лежал метод обработки потоков данных в процессоре. В соответствии с этой классификацией все современные ОКС попадают в класс Multiple Instruction stream, Multiple Data stream (MIMD, множественный поток команд, множественный поток данных).

Это концепция архитектуры ОКС для достижения параллелизма вычислений на основе работы асинхронных, независимых процессоров [1].

Следующая классификация Р. Хокни [2] основана на классификации М. Флина и детализирует класс MIMD ОКС. В ее основу положен следующий тип обработки данных: конвейерная, с переключателем и сетевая.

На базе двух классов ОКС Р. Хокни, была сформирована классификация Р. Дункана [3]. В ее основу положены архитектуры ОКС с переключателем и сетевые. В рамках этой классификации могут быть определены все современные архитектуры ОКС.

В этих классификациях учитываются аппаратные подходы к построению ОКС. Следует отметить отсутствие в них классификационных признаков областей применения ОКС.

В работе приведена классификация ОКС с учетом этих признаков.

2. Анализ классов отказоустойчивых компьютерных систем

В статье проведен анализ ОКС критического применения, построенных на основе Fault Tolerance Server. Сформирована классификация ОКС на основе следующих классификационных признаков:

- область применения ОКС;
- интенсивности функциональной нагрузки на ОКС.

Выбор этих признаков отображает различия в программно-аппаратной архитектуре ОКС. Полученная на их основе классификация представлена на рис. 1.

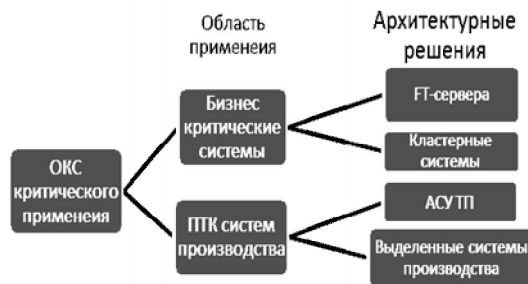


Рис. 1. Классификация ОКС

В зависимости от области применения ОКС подразделены на бизнес критические системы (БКС) и программно-технические комплексы (ПТК) систем производства (СП). Эти два класса систем имеют значительные архитектурные отличия, обусловленные условиями эксплуатации и типом функциональных нагрузок. БКС – это системы широкого спектра применения, а ПТК СП созданы для решения специализированных задач.

Архитектурные решения БКС подразделяется: на отказоустойчивые (Fault Tolerance, FT) сервера и кластерные системы. Класс ПТК СП: на автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и выделенные системы производства. Это разбиение получено на основе функциональной нагрузки при работе систем, которая определяет структуру системы. Так при построении малых, территориально локализованных, централизованных БКС применяются FT-сервера. Для более крупных, децентрализованных, распределённых БКС используются кластерные системы.

В работе представлен анализ класса современных FT-серверов. Представлены типовые дефекты и отказы этих систем.

В зависимости от метода компоновки FT-сервера делятся на блочные (Blade) и мейнфрейм системы. Blade система – это набор типовых серверов-блоков, которые объединены в едином корпусе. Такая система имеет высокую степень распределения ресурсов. Мейнфрейм система – это единый высокопроизводитель-

ный сервер. Распределение ресурсов мейнфрейма достигается за счет виртуализации доменов.

Далее приведен анализ архитектурных решений FT-серверов ведущих мировых производителей: HP, IBM, Oracle SUN.

2.1. Архитектура Hewlett-Packard NonStop (NS)

Высоконадежные сервера от HP представлены группой HP Integrity NonStop. В ее состав входит Blade Server NS50000c. Все сервера этой серии являются частью проекта HP Zero Latency Enterprise (ZLE) по созданию систем высокой надежности. Сервера этого проекта имеют операционную систему NonStop (NS). Они построены по блочному принципу.

NS50000c построен с применением четырех кратного резервирования. Четыре процессора Dual-core Intel® Itanium® processor 9100 series синхронизированы в работе, и система может определить правильный результат вычислений даже при сбое двух.

Аппаратная структура приведена в табл. 1.

Рассмотрим более детально принципы построения NS серверов HP. Архитектурные принципы построения этих систем в целом сходны для всего семейства и отличаются набором резерва и набором сервисов программного обеспечения, в зависимости от стоимости продукта. На рис. 2 представлена общая схема построения NS50000c серверов HP. Пунктиром выделены границы базовых единиц серверов семейства NS – процессорных ячеек второго поколения zx2.

Ячейка состоит из контроллера, модулей памяти каждого процессора, четырех процессоров, выходов на систему управления, платы расширения и выходов к другим ячейкам.

Ниже представлены четыре блока подсистем проверки результатов, подключенные по схеме все ко всем. Задача этих блоков в случае сбоя даже нескольких процессоров определить верный результат операции. Далее представлена сеть хранения данных (СХД). Она имеет в своем составе две независимых сети. СХД подключается к распределенному резервированному хранилищу данных.

2.2. Архитектура IBM z10

На рынке высокопроизводительных компьютеров IBM представлена как блочными серверами на базе процессоров Power7, так и мейнфрейм системами [4].

Рассмотрим мейнфрейм IBM – z10. Он создан для корпоративных центров обработки данных (ЦОД). Система базируется на процессоре z10, работающем на тактовой частоте 4,4 – 5 ГГц. Процессор имеет четыре ядра.

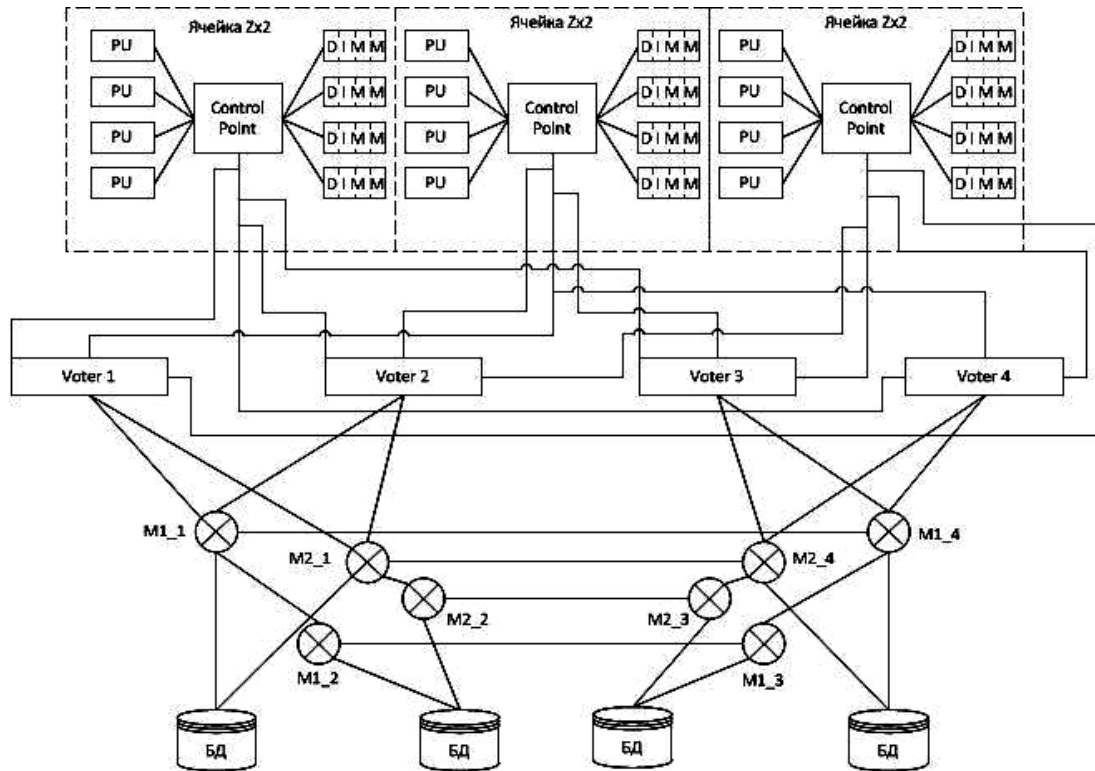


Рис. 2. Схема построения NS50000c

Машины оборудуются мультичиповыми модулями (Multi-Chip Module, MCM), именуемыми книгами блоков обработки (Processing Unit, PU). Один MCM содержит пять чипов z10, а так же SMP Hub Chip – контроллер исправности ядер, Storage Control – контроллер памяти.

Система z10 поддерживает использование специализированных машин, которые помогают повысить производительность мейнфрейма. Эти машины создаются с помощью реконфигурируемых PU.

z10 поддерживает систему кластеризации параллельных вычислений Parallel SysPlex.

На рис. 3 представлена обобщенная схема z10. Отдельно показано устройство процессорной книги. Она состоит из памяти кэш второго уровня (L2), соединенного со всеми процессорными модулями (PU) и двумя системами контроля вычислений (Check Point). Книга подключена к общей дублированной шине данных. Через шину данных осуществляется взаимодействие с хранилищем данных. Отличительной чертой рассматриваемой системы является организация доступа к оперативной памяти, она не выделяется книге так как, это делалось для ячеек у NS50000c. Доступ к ней осуществляется по шине данных.

2.3. Архитектура Sun SPARC Enterprise M9000

Этот мощный высокопроизводительный сервер обеспечивает максимальные вычислительные воз-

можности платформы SPARC/OC Solaris для виртуализации и консолидации в центре обработки данных. Это система класса мейнфрейм для платформы SPARC/Solaris. Она построена по архитектуре открытых систем.

Сервер Sun SPARC Enterprise M9000 может оснащаться 64-мя процессорами SPARC64 с тактовой частотой 2,28; 2,4 или 2,52 ГГц. Для монтажа такого количества процессоров используется расширительный корпус. Осуществляется поддержка 24 динамических доменов. Предусмотрены два служебных процессора на каждую домен/систему. Внешние системы хранения данных типа StorageTek (2540—9990). Удаленное обслуживание по технологии Sun Connect. Технические характеристики сервера приведены в табл. 1.

Работой сервера Sun SPARC Enterprise M9000 управляет служебный процессор Extended System Control Facility (XSCF), который непрерывно контролирует конфигурацию и общее состояние сервера, конфигурацию и состояние доменов, а также осуществляет мониторинг ошибок и направляет уведомления. Он может изолировать проблемы на уровне микросхем. Это позволяет запланировать ее обслуживание в соответствии с графиком и избежать дорогостоящих простоев.

Проанализируем более детально структуру мейнфрейма M9000. Базовыми строительными элементами этой системы являются четырех-ядерные процессоры на системных платах. Структурная схема системной платы мейнфрейма представлена на рис. 4.

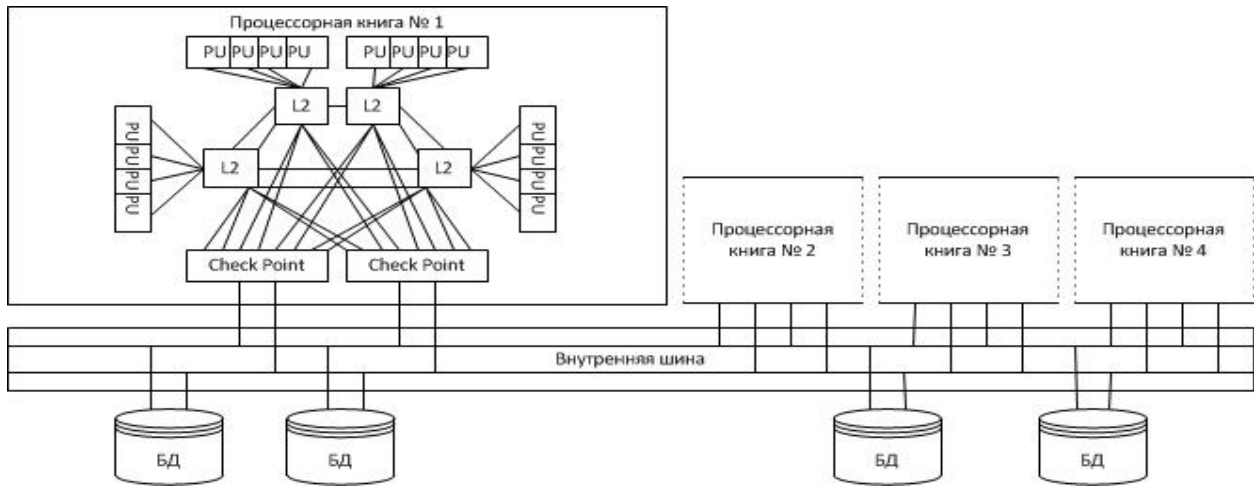


Рис. 3. Схема построения z10

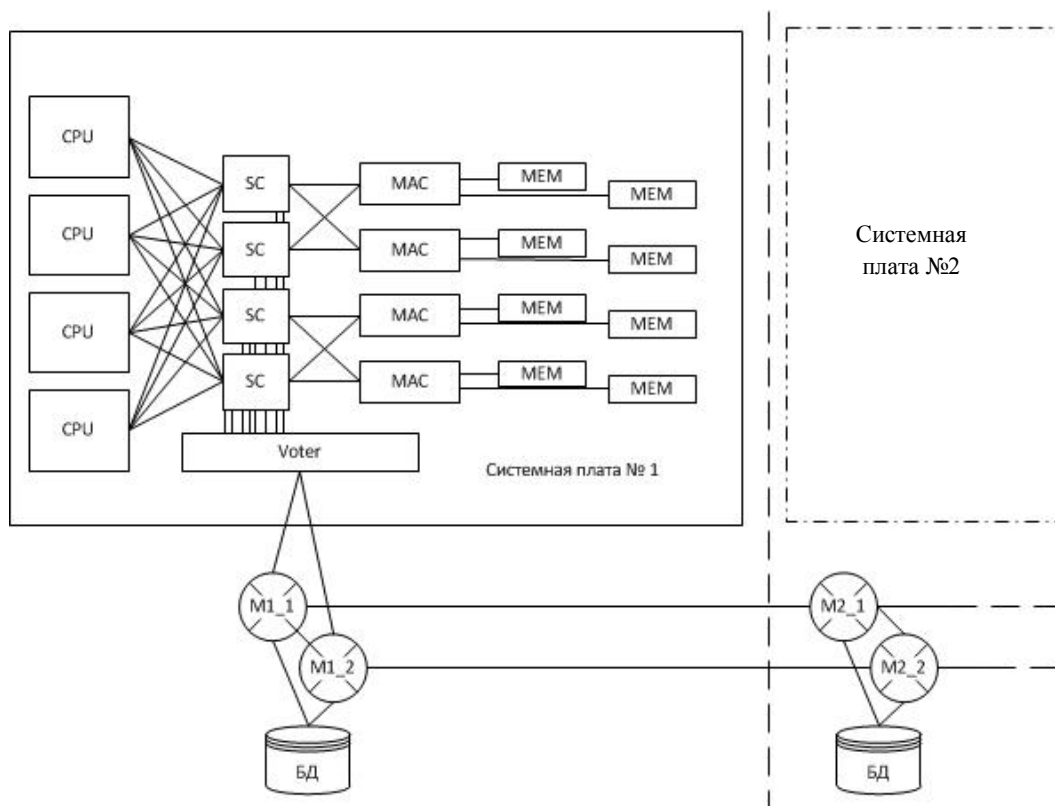


Рис. 4. Схема построения M9000

На схеме показаны четыре процессора (CPU) соединенные с Security Controller (SC) – контроллером безопасности, который подключен к контроллеру памяти Memory Access Controller (MAC). SC имеет дублированный канал связи с системой контроля вычислений. MAC, в свою очередь, подключена непосредственно к памяти. Это отличает мейнфреймы SUN и IBM.

На основе проведенного анализа архитектуры серверов построена сравнительная таблица структурных элементов FT-серверов, табл. 1.

Анализ технической документации и спецификаций для серверов: IBM z10, Sun M9000; HP NS5000c позволяет составить табл. 2, в которой приведена

сравнительная характеристика применённых технических решений для повышения их надежности.

3. Анализ возможных дефектов и вызываемых ими сбоев и отказов подсистем FT - серверов

Система может быть выведена из исправного состояния при возникновении в ней отказов различной природы [5].

В зависимости от их критичности система переходит в различные по уровню работоспособности состояния: исправное, работоспособное, частично работоспособное, не работоспособное [6].

Таблица 1

Сравнение структуры FT-серверов

Вид параметра	NS5000с	Z10	M9000
Структурный блок системы	Ячейка HP	Процессорная книга	Процессорный модуль
Модель процессора	Intel Itanium 2	Z10	SPARC VII+
Частота процессора	2,2 ГГц	4,4 ГГц	1,6 ГГц
Тип процессорной архитектуры	EPIC	CISC	RISC
Оперативная память	1 Тб	1,5 Тб	2Тб
Хранилище данных	896 Тб	1000Тб	790 Тб
Взаимодействие модулей (скорость до 1000Гб/с)	Server NET	Внутренняя шина для PU	Межкомпонентное с матричным переключателем
Аппаратное резервирование	FRM/TRM	Полное FRM	Полное FRM
Тип резерва	Горячий	Горячий	Горячий
Встроенная изоляция программных и аппаратных отказов	Программная блокировка частей схем и программных модулей	Программная блокировка частей схем и программных модулей	Программная блокировка и реконфигурация частей схем и программных модулей
Архитектура внутреннего соединения	Все ко всем двойной резерв	Все ко всем двойной резерв	Все ко всем

Все отказы являются результатом проявления различных дефектов. В современной литературе существует несколько подходов к классификации дефектов систем. В зависимости от среды проявления выделяют дефекты программных и аппаратных средств. Функциональная классификация дефектов ПО [7-9]:

- дефекты репликации данных;
- ошибки вычислений;
- дефекты логики.

По признаку версии дефекты классифицируются:

- относительные – охватывают подсистему или ПО одного типа (версии);
- групповые – охватывают группу подсистем или несколько версий ПО;
- абсолютные – охватывают все подсистемы определенного функционала или все версии ПО [10].

По времени внесения классифицируют [6]:

- дефекты проектирования и производства (ДП);
- дефекты физические (ДФ);
- дефекты взаимодействия (ДВ).

В табл. 3 приведен анализ возможных отказов систем сервера, а так же проанализирован характер их проявления.

Таблица 2

Сравнительный анализ технологических решений для повышения надежности серверов: IBM, Sun, HP

Технологическое решение	Z10	M9000	NS 5000с
Механизм группирования подпространств CISC	+		
Защита памяти подсистемы	+	+	+
Наличие резервирования и горячая замена процессоров без прерывания работы системы	+	+	+
Параллельное обслуживание ESCON, FICON, OSA-E	+		
Одновременное использование консоли управления оборудованием (HMC) и сервисных элементов	+	+	+
Параллельное обновление внутреннего кода	+	+	+
Параллельное управление электропитанием и тепловым режимом	+	+	+
Дублированные сервисные элементы	+	+	+
Динамическое изменение конфигурации сопроцессора	+		
Динамическое управление канальными путями	+	+	
Динамическое переконфигурирование каналов ввода-вывода	+	+	+
Динамическое резервирование памяти	+	+	+
Динамическое переключение задающего генератора	+	+	
Динамическое добавление подсистем логических каналов	+		
Динамическое добавление групп подканалов	+	+	
Драйверы ввода/вывода повышенной надежности	+	+	+
Динамическое добавление разделов	+	+	+
Автоматическое восстановление конфигурации после перезагрузки	+	+	+
Динамическое переконфигурирование	+	+	+
Имитация микропрограммного обеспечения	+	+	+
Подключаемые оптические разъемы FICON Express4	+		
Фиксированная область памяти HSA	+		
Гибридная система охлаждения	+	+	+
Поддержка внутренней батареи	+		
Резервирование блоков питания по схеме N+1	+	+	+
Перезагрузка части памяти	+	+	
Планирование памяти	+	+	+
Гарантированная целостность передачи данных SMP	+	+	+
Синхронизация диагностики QDIO	+		
Резервирование каналов ввода-вывода	+	+	+
Резервирование для защиты систем хранения	+	+	+
Прозрачное резервирование центрального процессора	+	+	+
Общая защита памяти и регистров процессора	+	+	+
Возможность отключения отдельных процессоров	+	+	+
Повторная попытка запуска команд		+	
Предупредительное самовосстановление		+	+

Таблица 3
Анализ отказов подсистем сервера

Подсистема сервера (ПС)		Вид сбоя/отказа (ВС)
I. Сеть обмена данными		1. Сбой стека протоколов
		2. Обрыв канала связи
		3. Сбой ОС маршрутизатора
		4. Отказ маршрутизатора
		5. Искажение данных в канале связи
		6. Лавинная передача
		7. Затор трафика
II. Хранилище данных		1. Сбой адресации памяти
		2. Отказ схем контроллеров памяти
		3. Сбой носителя памяти
		4. Отказ системы чтения/записи
		5. Сбой внутреннего ПО контроллеров памяти
		6. Отказ контроллера зеркала
		7. Нарушение алгоритмов зеркалирования
III. Блок функционирования одной операционной системы	Подсистема проверки результатов	1. Сбой во внутренней логике
		2. Физический отказ устройства
	Подсистема контроля доступа	3. Проявление уязвимости алгоритмов защиты памяти
		4. Физический отказ устройства
	Процессорный модуль	5. Превышение/падение частоты
		6. Отказ вследствие аппаратных ошибок логических схем
		7. Отказ системы команд
	Память оперативная	8. Превышение/падение частоты
		9. Нарушение адресации
		10. Затор в шине данных
		11. Физический отказ модулей
IV. Система охлаждения		1. Отказ программной системы контроля
		2. Физический отказ блоков контроля
		3. Отказ системы кондиционирования воздуха
		4. Отказ системы подачи воздуха
V. Система питания		1. Отказ аккумуляторных батарей
		2. Отказ ПО системы контроля питания
		3. Отказ системы нормализации питания
VI. Отказ ПО		1. Остановка ядра ОС системы
		2. Остановка службы
		3. Отказ драйвера

Таблица 4
Классификация отказов FT-сервера

Причина возникновения отказа	Конструктивные недоработки	Воздействие персонала	Взлом извне	Социальные воздействия	Природные воздействия	Временной характер	Степень опасности при											
							Единичном отказе	Групповом отказе										
ПС	ВС	АС	ПС	ошибки	Случайные	Взлом	Социальные воздействия	Природные воздействия	Постоянный	Переменяющийся	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая		
I	1																	
	2																	
	3																	
	4																	
	5																	
	6																	
	7																	
II	1																	
	2																	
	3																	
	4																	
	5																	
	6																	
	7																	
III	1																	
	2																	
	3																	
	4																	
	5																	
	6																	
	7																	
IV	1																	
	2																	
	3																	
	4																	
	5																	
	6																	
	7																	
V	1																	
	2																	
	3																	
	4																	
	5																	
	6																	
	7																	
VI	1																	
	2																	
	3																	

В табл. 4 приведена классификация отказов подсистем сервера по причинам их возникновения, характера проявления во времени и степени опасности.

Эта классификация охватывает 35 вариантов отказа системы, что позволяет построить функционально полные модели FT-серверов.

При построении этих моделей следует учитывать:

- условия эксплуатации системы;
- нормативные (отраслевые) требования по безопасности систем рассматриваемого типа;
- техническая документация и уровни надежности отдельных комплектующих подсистем;
- уровень необходимой безопасности системы по стандартам SIL;
- предполагаемый срок службы системы.

Такие модели FT-серверов обеспечивают адекватное моделирование технического (ТС) и информационного (ИС) состояния системы.

Также обеспечивается высокая точность оценки их готовности.

При построении комплексных моделей готовности возможен переход к анализу информационно-технического состояния (ИТС). Возможность такого перехода описана в работе [6].

При наличии средств оперативного мониторинга ИТС и вычислительных ресурсов, возможно построение моделей готовности системы на основе оперативно-информационно-технического состояния (ОИТС).

Выводы

В статье проведен анализ классификаций ОКС. Выполнена классификация ОКС по признакам:

- область применения ОКС;
- интенсивности функциональной нагрузки на ОКС.

Выполнен анализ архитектур построения FT-серверов NS50000с, z10, M9000. Произведен анализ дефектов FT-серверов. Построены классификационные таблицы.

Выполнен анализ отказов FT-серверов. Сформирована таблица зависимостей их дефектов и отказов. Сформирована классификация возможных дефектов FT-сервера. Определена возможность построения моделей для ИТС анализа.

Далее возможно на основе стандартов [5, 11-13] произвести анализ методов оценки полученных моделей FT-серверов.

Литература

1. Flynn, M. *Very high-speed computing system* [Text] / M. Flynn // Proc. IEEE. – 1966. – N 54. – P.1901-1909.
2. Hockney, R. *Parallel Computers: Architecture and Performance*. [Text] / R. Hockney. // Proc. of Int. Conf. Parallel Computing'85. – 1986. – P. 33 – 69.

3. Duncan, R. *A survey of parallel computer architectures*. [Text] / R. Duncan // Computer. – 1990. – V.23, N 2. – P. 5 – 16.

4. IBM Systems and Technology Data Sheet IBM System z10 EC [Text]// IBM Press. – 2010. – P. 15.

5. IEC 61508 “Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems” [Electronic resource]. – Url: <http://www.61508.org>. – 22.02.2012.

6. Харченко, В.С. Информационно-технические состояния компьютеризированных систем: модель событий и показатели гарантоспособности. [Текст] / В.С. Харченко, О.Н. Одарущенко // Системы управления и навигации и связи: сб. науч. тр. ЦНИИ НУУ. – К., 2009. – Вып. 3 (11). – С. 45 – 51.

7. Liu, Y. *Modeling and Analysis of Software Rejuvenation in Cable Modem Termination System*. [Text] / Y. Liu, H. Levendel, K.S. Trivedi // ISSRE. – 2002. – Vol. 12, № 17. – P. 159-170.

8. Analysis and Implementation of Software Rejuvenation in Cluster Systems. [Text] / K. Vaidyanathan, R. E. Harper, S. W. Hunter, K. S. Trivedi // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. – 2001. – Vol. 29, № 1. – P. 62 – 71.

9. Vaidyanathan, K. *Extended Classification of Software Faults Based on Aging*. [Text] / K. Vaidyanathan, K.S. Trivedi // Proc. IEEE Software Reliability Engineering. – 2001. – Vol. 6, № 8. – P. 41 – 42.

10. Харченко, В.С. Метрики диверсности: Классификация, анализ и применение для оценки надежности и безопасности компьютерных систем управления. [Текст] / В.С. Харченко, И.В. Пискачева, В.В. Скляр // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «Харьк. авиац. ин-т». – Х., 2001. – Вып. 9. – С. 194 – 214.

11. ГОСТ Р 51901-2002 Анализ риска технологических систем [Текст] / Технический комитет по стандартизации. – М.: Стандартинформ, 2002.

12. IEC 60300-3-1:2003 Dependability management – Part 3-1: Application guide –Analysis techniques for dependability [Text]. – Guide on methodology [Text]/ IEC 2003 P. 45.

13. ГОСТ Р 51901.15-2005 (МЭК 61165:1995) Менеджмент риска. Применение Марковских методов [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2005.

Поступила в редакцию 22.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования РЭС ЛА В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР ВІДМОВОСТІЙКИХ СЕРВЕРІВ
ДЛЯ ОЦІНКИ ЇХ НАДІЙНОСТІ***О.М. Одарущенко, С.В. Живило, В.С. Харченко, О.Б. Одарущенко*

Розглянуті варіанти архітектури для побудови сучасних відмовостійких серверних систем. Визначена множина можливих дефектів та відмов. Дефекти та відмови прокласифіковані на основі визначеного переліку ознак. Проведено аналіз класифікацій відмовостійких комп'ютерних систем (ОКС). Виконана класифікація ОКС за ознаками: область застосування ОКС та інтенсивності функціонального навантаження на ОКС. Зроблено аналіз дефектів FT-серверів. Виконано аналіз відмов FT-серверів. Сформовано таблиця залежностей їх дефектів і відмов.

Ключові слова: сервер, апаратна архітектура, відмово стійка комп'ютерна система.

**ARCHITECTURAL ANALYSIS OF FAULT-TOLERANT SERVERS
FOR EVALUATION OF THEIR RELIABILITY***О.М. Odarushchenko, S.V. Zhyvylo, V.S. Kharchenko, O.B. Odarushchenko*

There were analyzed the variants of server systems' architecture, determined set of possible defects and failures. Defects and failures were classified from a list of features. The analysis of the classification of fault-tolerant computing systems (ACS). Are classified on the grounds of ACS: ACS scope and intensity of functional load on the ACS. The analysis of defects in FT-servers. The analysis of the FT-server failures. Formed a table of dependency defects and failures.

Keywords: server, hardware architecture, fault-tolerant, computer system.

Одарущенко Олег Николаевич – канд. техн. наук, доцент, декан факультета информационных и телекоммуникационных технологий и систем Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка, Полтава, Украина.

Живило Сергей Владимирович – аспирант кафедры компьютерной инженерии Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка, Полтава, Украина.

Харченко Вячеслав Сергеевич – заслуженный изобретатель Украины, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедры компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: v.kharchenko@khai.edu.

Одарущенко Елена Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и математического моделирования Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка, Полтава, Украина.