

МИРОШНИК М. А., д.т.н., профессор (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта),

МОЖАЕВ А. А., д.т.н., профессор (Харьковский национальный университет внутренних дел)

Методы автоматизированного проектирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения

В статье проведен обзор методов проектирования информационных гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения, проанализированы требования, представлены описание информационных технологий, их составляющих, условий использования, результатов их применения. Предложен метод автоматизированного проектирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения при включении оперативных задач в систему управления. Проведен анализ особенностей, возникающих при реконфигурации. Анализируются современное базовое техническое и программное обеспечение компьютерных систем объектов критического применения. Сформулированы общие требования к компьютерным системам объектов критического применения и их компонентов. Определены тенденции развития и существующие потребности компьютерных систем и сетей критического применения.

Авторами на основе анализа гетерогенных компьютерных сетей и теоретического обобщения работ в области автоматизированного проектирования систем критического применения разработан метод автоматизированного проектирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения.

Ключевые слова: гетерогенная сеть, алгоритм, система критического применения, распределенная система, графа, автоматизированное проектирование.

Постановка проблемы

Решение одной из глобальных проблем современности – предупреждения технологических катастроф зависит от достигнутого уровня функциональной безопасности технических и программных компонентов, которые используются в компьютерных системах критического применения и какие можно классифицировать по типу элементной базы, принципу действия, принципу достижения безопасности. Современный этап развития теории построения компьютерных систем критического применения характеризуется противоречием, что существующие системы, которые массово применяются, морально и физически устарели и требуют замены, при этом методы и идеология построения новых систем по многим важным показателям, особенно показателем безопасности, уступают существующим. В связи с этим актуальной является проблема разработки и реализации методов и средств проектирования технических и программных компонентов безопасных контроллеров с параллельной архитектурой и решение противоречия между существующими методами построения систем критического применения на элементах с симметричными и несимметричными отказами [1].

Создание и функционирование современных компьютерных систем и сетей критического применения является проблемой мирового уровня. Такие автономные системы, которые объединяются при взаимодействии в компьютерные системы и сети, выполняют свои функции и управляются собственниками на многотысячных расстояниях средствами гетерогенных каналов связи, уже используются и планируются к внедрению в различных областях хозяйства [2].

Большинство компьютерных сетей является гетерогенными, то есть состоят из разнообразных программно-аппаратных средств под управлением разных операционных систем, это является серьезным препятствием для достижения необходимого качества обслуживания, в частности временных требований, для многих информационных систем критического применения [3].

Традиционные методы распределения сетевого трафика допускают сглаживание трафика информационных потоков на основе статистического мультиплексирования. Существующие методы управления перегрузками, которые использовались на критических участках, также не учитывают свойств трафика гетерогенных сетей. Это обстоятельство показывает необходимость усовершенствования классического математического инструментария анализа и синтеза распределенных компьютерных систем и сетей критического применения [4].

В связи с этим исследование методов и средств построения и функционирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения с целью повышения оперативности передачи информации в условиях увеличения ее объемов, является **актуальным**.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ работ в области автоматизированного проектирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения показывает, что при разработке таких систем возникает много важных вопросов, которые на сегодняшний день не решены. Все это значительно ухудшает характеристики при прохождении трафика [5].

В настоящее время используются модели и методы управления интегральными потоками, основанные на классической теории трафика. Однако повышение значений интенсивности в условиях постоянного увеличения объемов информации и повышения степени ее гетерогенности приводит к неадекватности процесса управления профилем трафика, отсутствию возможности учета короткочастных пиков. Условия для возникновения данных проблем основываются на сложностях системного характера, связанных с несовершенством принципов построения и алгоритмов функционирования сетевых технологий. На практике это проявляется в недостаточном качестве методов передачи информации в гетерогенных компьютерных сетях, что в итоге приводит к недопустимым задержкам в процессе обмена информацией в критических системах [6].

Одной из основных черт трафика гетерогенной сети есть его существенная нестабильность, периодичность, которая является следствием несогласованного взаимодействия составных частей интегрального трафика, управляющихся разными программно-аппаратными средствами. Необходимо создать модель трафика гетерогенной компьютерной сети, основанной на его представлении в виде функций, которые являются решением поставленной задачи [7].

Существующие сегодня методы и средства управления гетерогенными компьютерными системами и сетями критического применения для распределения вычислительного процесса в гетерогенных кластерных и облачных системах уменьшают скорость работы и увеличивают затраты на ее выполнение. Если есть открытый доступ к информации, то как причины возникновения этих недостатков можно отметить эволюционное развитие этих средств, которые опираются на использование моделей, методов и информационных технологий, какие разрабатывались в условиях локальных компьютерных систем, кластеров, а на более высоком

уровне объединялись с помощью существующих на тот момент коммуникационных средств [8].

Также со временем возникло противоречие между резко возрастающей сложностью современных вычислительных задач и потенциальными технологическими возможностями существующих инструментальных средств управления распределенным вычислительным процессом, которые должны учитывать множество функциональных требований к заданиям, среде исполнения и ресурсам. Следовательно, возникает необходимость повышения эффективности использования вычислительных ресурсов и уменьшения времени выполнения задания в кластерных и облачных вычислениях. Таким образом, проблема автоматизированного проектирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения является актуальной [9, 10].

Формулирование целей: целью работы является исследование методов и средств построения и функционирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения.

Основная часть исследования

В настоящее время происходит интенсивное развитие информационных технологий, связанных с распределенной обработкой больших объемов информации. К наиболее масштабным относят технологии использования гетерогенных кластерных и облачных вычислений. Эта тенденция вызывает повышенный интерес к распределенным вычислительным процессам, которые используют облачные и удаленные компьютерные ресурсы как инструмент решения задач повышенной сложности. Кроме того, на сегодняшний день в большинстве сфер производства используются информационные технологии распределенных вычислений, с помощью которых осуществляется деятельность отдельных компаний, что позволяет автоматизировать ряд производственных процессов.

Распределенная система обычно является неоднородной, т.е. гетерогенной, потому что строится на множестве распределенных в пространстве вычислительных ресурсов с разными характеристиками. Задания, которые поступают для выполнения в компьютерную систему, тоже являются неоднородными, что усложняет задачу эффективного распределения. Поэтому важное место в ходе распределения отводят технологиям планирования заданий, которые выполняют сложное распределение используемых вычислительных ресурсов. Большое количество исследований направлено на создание методов распределения заданий по вычислительным ресурсам, которые позволили бы минимизировать время простоя ресурсов, уменьшить объемы и время переданной информации между ними.

Основной проблемой создания и функционирования гетерогенных компьютерных сетей критического использования является то, что они состоят из разнообразных программно-аппаратных средств под управлением разных операционных систем.

В отличие от обычных распределенных компьютерных систем, которым свойственна детерминированность и можно определить множество всех возможных состояний такой системы в любой момент времени, для гетерогенных систем невозможно однозначно предвидеть их дальнейшее поведение. Даже зная координаты и скорость такой системы в начальный момент времени, нельзя определить механические или электромагнитные препятствия, с которыми подвижная система столкнется во время функционирования, поэтому от такой системы ожидают быстрый отклик, учитывая то, что теоретические основы движущихся компьютерных сетей базируются на поведении теории стаи биологических объектов.

В этом случае для предупреждения критической ситуации или выхода из нее обработка данных в компьютерной системе проводится на скоростях порядка гигабит в секунду (гигабит/с). Программирование с использованием математических методов оптимизации и методов компьютерного программирования должно состоять из декомпозиции деревьев графа на ветви для улучшения времени выполнения задания.

Рассматривая общую компьютерную систему критического применения, целесообразно выделять этапы управления такой сетью до наступления инцидента, во время критического использования и после инцидента.

Инфокоммуникационные сети имеют многоуровневую структуру, основными характеристиками которой являются суммарные интенсивности потоков данных на каждом уровне и коэффициенты поглощения между уровнями, для их определения разработана модель потоков данных многоуровневой информационной структуры, которая формально определяет подсети и группы узлов, что дает возможность определить параметры потоков данных между узлами в пределах группы, а также между подпараметрами. Полученные результаты дают возможность оценить потоки данных, загрузки структурообразующего оборудования и потоки каждого задания.

Методы управления в гетерогенной компьютерной сети

Для критического участка магистрали гетерогенной компьютерной сети предложен метод прогноза фрактального трафика, который делает хорошие оценки среднего значения магистрального трафика, не перегружая сеть служебной информацией.

На начальном этапе анализа проводится исследование простейшей модели гетерогенной сети с одним узким местом, для которой свойственны все характерные черты телекоммуникационного трафика интегрированной сети с коммутацией пакетов, самоподобие и масштабная инвариантность. Для исследования данного участка магистрального трафика используются локальные пробные пакеты, которые обязательно проходят через критическую область.

В предложенном методе [2] прогнозирования телекоммуникационного трафика пакеты отправляются друг за другом через малый промежуток времени. Анализируя, получаем равенство (1)

$$\hat{f}_a(n+1) = [a_1 \dots a_n] \begin{bmatrix} f_a(1) \\ \dots \\ f_a(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

где a_i , a_n , - коэффициенты, полученные с помощью метода наименьших квадратов (2)

$$[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] = [R(n) \ R(n-1) \ \dots \ R(1)] \times \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

а $R(n)$ - функция временных интервалов с оценкой (3)

$$R(i) \cong R^{(m)}(i) = \frac{1}{n} \sum_{l=i+1}^n f_a(l) f_a(l-i) \quad (3)$$

Для определения качества прогнозирования трафика предложенным способом определим среднеквадратичную погрешность прогноза (4)

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 - [R(n) \ R(n-1) \ \dots \ R(1)] \times \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} R(n) \\ R(n-1) \\ \dots \\ R(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

в которой можно использовать результат (5):

$$R(\tau) \sim H(2H - 1)\tau^{2H-2} \quad (5)$$

После получения прогноза для $f_a(n+1)$ можно, расширив последовательность $f_a(k)$, получить прогноз значений $f_a(n+2)$ и т. д. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока будет сделано необходимое число прогнозов [2].

Метод автоматизированного проектирования в гетерогенных компьютерных сетях

В результате проведенных исследований установлено, что загрузка всех ресурсов сети должна быть максимально возможной для повышения объемов передаваемого трафика. Для того чтобы достичь сбалансированной загрузки всех ресурсов сети благодаря рациональному выбору путей прохождения трафика через сеть, в общем случае лучше использовать процедуры альтернативной, разветвленной маршрутизации [2].

Модель гетерогенной компьютерной сети передачи информации состоит из N узлов коммутации и M линий связи, которые абсолютно надежны и помехоустойчивы; узлы коммутации имеют бесконечную память; время обработки в узлах коммутации отсутствует; длины всех сообщений независимы и распределены по показательному закону со средним значением $1/\mu$ (байт); трафик, поступающий в сеть, образует пуассоновский поток со средним значением γ_{ij} (сообщений / мин) для сообщений в узле [2].

Тогда полный внешний трафик имеет вид (6)

$$\gamma = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}; \quad (6)$$

Каждая линия связи состоит из единого дуплексного канала связи с пропускной способностью, которая равна P_{kl} (байт/мин). Пусть $X_{kl}^{(i,j)}$ - часть потока, который проходит линией (k, l) :

$$0 \leq X_{kl}^{(i,j)} \leq 1. \quad (7)$$

Тогда

$$\lambda_{kl} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} X_{kl}^{(i,j)}, \quad (8)$$

где γ_{kl} - величина потока в линии, которая обусловлена потоком γ_{ij} .

Пусть Z_{ij} - среднее время, затрачиваемое на передачу сообщения, которое возникло в узле. Важной характеристикой качества функционирования гетерогенной сети является средняя задержка сообщения в сети - T, которая определяется как уравновешенная сумма задержек, то есть

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \gamma_{kl} Z_{kl}. \quad (9)$$

Среднее время пребывания сообщений в линии (k, l) , состоящее из времени передачи сообщения $1/\mu P_{kl}$ и времени ожидания в очереди - W_{kl} , определяется по формуле (10)

$$t_{kl} = \frac{1}{\mu P_{kl}} + W_{kl}, \quad (10)$$

или

$$W_{kl} = \frac{1}{\mu P_{kl}} \cdot \frac{\lambda_{kl}}{\mu P_{kl} - \lambda_{kl}}, \quad (11)$$

$$t_s = \frac{1}{\mu P_{kl} - \lambda_{kl}}. \quad (12)$$

Если определить величину потока в линии (k, l) как $f_{kl} = \frac{\lambda_{kl}}{\mu}$ (байт/мин), то

$$t_{kl} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{P_{kl} - f_{kl}}. \quad (13)$$

При подстановке (7) в (5) получим выражение (14) для средней задержки сообщений в сети

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{f_{kl}}{P_{kl} - f_{kl}}. \quad (14)$$

Сделанные предположения и обозначения позволяют сформулировать задачу поиска таких значений переменных $X_{kl}^{(i,j)}$, которые обеспечат оптимальное (наименьшее) значение величины T .

Таким образом, сформулирована задача оптимизации. Необходимо найти переменные $X_{kl}^{(i,j)}$ и соответственно потоки в линиях связи $f_{kl}^{(i,j)}$ такие, что

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{f_{kl}}{P_{kl} - f_{kl}} \rightarrow \min \quad (15)$$

при выполнении ограничений (16)-(19):

$$f_{kl} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} X_{kl}^{(i,j)}, \quad k, l = 1, 2, \dots, N; \quad (16)$$

$$f_{kl} < P_{kl}, \quad k, l = 1, 2, \dots, N; \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^N X_{kl}^{(i,j)} - \sum_{k=1}^N X_{lk}^{(i,j)} = \begin{cases} -1, & l = i; \\ 0, & l \neq i, j; \\ 1, & l = j; \end{cases} \quad (18)$$

$$0 \leq X_{kl}^{(i,j)} \leq 1, \quad i, j, k, l = 1, 2, \dots, N. \quad (19)$$

Ограничения (16–19) предполагают, что для передачи сообщений от узла к узлу может быть использовано более одного маршрута, то есть задача (16) – (19) описывает альтернативную процедуру выбора маршрутов. Наиболее известным методом решения данной задачи является метод отклонения потока, который уменьшает значение целевой функции до минимума.

Существующие и перспективные компьютерные сети строятся на основе полной интеграции всех ресурсов. Важной особенностью таких сетей является полностью унифицированное представление информационных сообщений из разнородных источников информации. Унифицированное представление разнородной информации позволяет обеспечить при построении системы передачи и распределении информации предельно высокую скорость информационной и аппаратной интегрированности.

Для анализа такой сложной многоуровневой иерархической системы, которой является гетерогенная компьютерная система, необходимо провести ее моделирование. Отправитель также должен периодически отслеживать количество

подтвержденных передаваемых данных и достигнутую им производительность. Это становится возможным при использовании специального фильтра. Функцию временного ряда можно представить как

$$f(t) = (1 - \alpha) \cdot f(t_0) + \alpha \cdot \frac{Q}{t - t_0}, \quad (20)$$

где Q – количество информации, для которой существует подтверждение о передаче с момента времени t_0 .

Трафик является фрактальным и он имеет долговременную зависимость. Проведем краткий анализ таких распределений, используя распределение Парето. Случайная переменная X удовлетворяет распределению Парето, если ее функция распределения имеет вид

$$f(x) = \alpha k^\alpha x^{-(\alpha+1)}, \quad x \geq k$$

Разработан метод прогнозирования трафика, основным недостатком которого является его вычислительная сложность. Для упрощения вычислений можно использовать предиктор, заключающийся в замене линейной комбинацией n последних образцов. Вместо уравнения (10) для вычисления коэффициентов будут использоваться следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (21)$$

и

$$a_i = (n + 1 - i)^{2H-2}, \quad (22)$$

где H – параметр Херста. Пусть $F(Z)$ – Z -преобразование от f_k^m , а \hat{f}_k^m – предполагаемое значение f_k^m . Тогда

$$\hat{F}(Z) = H(Z) F(Z), \quad (23)$$

где $H(Z)$ – передаточная функция предиктора, которая имеет форму

$$H(Z) = a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-n}. \quad (24)$$

Выводы

Проведений обзор существующих моделей и методов автоматизированного проектирования гетерогенных компьютерных систем и сетей критического применения позволил сделать вывод о необходимости создания и внедрения технологий и решений для поддержки сетевых ресурсов на уровне, необходимом для обеспечения функционирования.

Определено существование противоречия между тенденцией увеличения топологической сложности распределенных компьютерных систем, повышением количества информации, которая передается в сетях в условиях высокого информационного риска, и повышением требований к оперативному подходу к управлению параметрами сети, ориентированному на эффективное выполнение прикладных задач.

Определены основные этапы проведения анализа инфокоммуникационных сетей, с учетом которых разработана структурная схема методологий управления потоками данных сети. Сформулированы принципы методологий, которые отображают особенности объекта исследования и реализованы в моделях структуры сети, методах управления трафиком и рисками.

Список использованных источников

1. Караман Д. Г., Малиновский М. Л., Мирошник М. А. Метод проектирования строго безопасных автоматов локомотивной сигнализации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2012. №5. С. 25-42.
2. Можаяев О. О. Моделі та методи передачі інформації у гетерогенних комп'ютерних мережах: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. 39 с.
3. Волк М. О. Моделі, методи та інформаційна технологія управління розподіленим обчислювальним процесом в гетерогенних комп'ютерних системах: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків: ХНУРЕ, 2019. 43 с.
4. Куклов В. М. Методика передачі з'єднання рухомих абонентів гетерогенних програмно-конфігурованих мереж: автореф. дис. канд. техн. наук. К.: ДУТ, 2018. 22 с.
5. Косенко В. В. Методологія ризик-адаптивного управління потоками даних інфокомунікаційних мереж систем критичної інфраструктури: автореф. дис. д-ра техн. наук. Харків: ХНУРЕ, 2018. 44 с.
6. Кирик М. І. Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах. Львів: НТУ «Львівська політехніка», 2018. 44 с.
7. Масюк А. Р. Моделі та алгоритми управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах. Львів: НТУ «Львівська політехніка», 2018. 44 с.

8. 15-th International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE-2019). Kunibiki Messe, Matsue, Japan, March 27-29, 2019. URL: <http://voyager.ce.fit.ac.jp/conf/hwise/2019/>.
9. Kovalenko A. A., Kuchuk G. A., Nechausov S. M. Інформаційні технології синтезу і реконфігурації структур комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр. Полтава: ПНТУ*, 2018. Т. 2 (48). С. 73-76.
10. Kovalenko A. A., Kuchuk H. A. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. *Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр. Полтава: ПНТУ*, 2018. Т. 1 (47). С. 110-113.

Мірошник М. А., Можасв А. А. Методи автоматизованого проектування гетерогенних комп'ютерних систем та мереж критичного застосування.

Анотація. У статті проведено огляд методів проектування інформаційних гетерогенних комп'ютерних систем і мереж критичного застосування, проаналізовані вимоги, подано опис інформаційних технологій, їх складових, умов використання, результатів їх застосування. Запропоновано метод автоматизованого проектування гетерогенних комп'ютерних систем і мереж критичного застосування при включенні оперативних завдань в систему управління. Проведено аналіз особливостей, що виникають при реконфігурації. Аналізується сучасне базове технічне і програмне забезпечення комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. Сформульовано загальні вимоги до комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування та їх компонентів. Визначено тенденції розвитку та існуючі потреби комп'ютерних систем і мереж критичного застосування.

Авторами на основі аналізу гетерогенних комп'ютерних мереж і теоретичного узагальнення робіт у галузі автоматизованого проектування систем критичного застосування розроблений метод автоматизованого проектування гетерогенних комп'ютерних систем і мереж критичного застосування.

Ключові слова: гетерогенна мережа, алгоритм, система критичного застосування, розподілена система, графа, автоматизоване проектування.

Maryna Miroshnyk, Oleksandr Mozhaev. Computer-aided design methods for heterogeneous computer systems and critical application networks.

Abstract. The article provides a review of design methods for heterogeneous computer information systems and

critical application networks, analyzes requirements, provides a description of information technologies, their components, conditions of use, results of their application. A method for the computer-aided design of heterogeneous computer systems and critical application networks is proposed when operational tasks are included in the control system. The analysis of features arising during reconfiguration is carried out. The modern basic technical and software of computer systems for critical applications are analyzed. The general requirements for computer systems of critical applications and their components are formulated. The development trends and existing needs of computer systems and networks of critical application are determined.

Based on the analysis of heterogeneous computer networks and theoretical generalization of work in the field of computer-aided design of critical application systems, the authors have developed a method for the computer-aided design of heterogeneous computer systems and critical-use networks.

Keywords: heterogeneous network, algorithm, critical application system, distributed system, graph, computer-aided design.

Надійшла 27.06.2019 р.

*Мірошник Марина Анатоліївна, доктор технічних наук, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: miroshnyk@kart.edu.ua
<http://orcid.org/0000-0002-2231-2529>*

*Мозаєв Олександр Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій Харківського національного університету внутрішніх справ, Харків, Україна. E-mail: mozhaev57@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-1412-2696*

*Miroshnyk Maryna Anatolijvna., doctor of technical science, professor of the Department of Computer Systems Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: miroshnyk@kart.edu.ua
<http://orcid.org/0000-0002-2231-2529>*

*Mozhaev Oleksandr Oleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine. E-mail: mozhaev57@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-1412-2696*