

Обзор моделей и методов обеспечения сохранности данных в распределенных системах обработки данных

Е.А. Микрин, С.К. Сомов

Аннотация. В статье сделан краткий обзор формальных моделей и методов, используемых для обеспечения сохранности информации в системах обработки данных различного масштаба и назначения. Основное внимание уделено методам обеспечения сохранности информации в распределенных системах, работающих на основе компьютерных сетей. Перечислены основные причины возникновения инцидентов с данными и описано их влияние на бизнес компаний. Рассмотрен актуальный в настоящее время метод репликации данных, обеспечивающий не только сохранность данных в распределенных системах, но и быстродействие этих систем. Приведен пример оптимизации распределения реплик в GRID-сетях. Рассмотрены формальные модели и методы использования восстановительного резервирования, повышающего уровень сохранности данных, и концепция использования структурно-технологического резерва для повышения быстродействия распределенных систем.

Ключевые слова: сохранность данных, распределенные системы, репликация, восстановительное резервирование, структурно-технологический резерв.

Введение

Распределенные системы обработки данных (РСОД), построенные на базе компьютерных сетей, являются сложными техническими системами, основанными на взаимодействии огромного числа программных, аппаратных и информационных компонент. Важнейшей задачей при проектировании РСОД различного масштаба и назначения является обеспечение высокого уровня надежности и производительности их функционирования. Особенно важно обеспечить именно надежность работы системы, так как практически каждая из компонент РСОД как технически сложной системы имеет ненулевую вероятность отказа. В частности, на сохранность информационной компоненты РСОД влияет множество факторов, приводящих к потере, разрушению, искажению информации и, в итоге, к нарушению безопасности, простоя или к отказу всей системы [1].

В статье представлен краткий обзор причин возникновения сбоев/инцидентов при функционировании автономных и распределенных систем обработки данных различного масштаба и назначения, приводящих к частичной или полной потере информации, а в наиболее серьезных случаях к приостановке деятельности компаний, работа которых основывается на использовании возможностей систем данного класса.

Восстановление разрушенного программного и информационного обеспечения и работоспособности системы требует затрат времени и ресурсов, иногда очень значительных. В особо тяжелых случаях восстановление информации и, соответственно, работоспособности системы становится просто невозможным за приемлемое время.

В статье рассматриваются формальные модели и методы, которые позволяют повысить сохранность информации в системах обработки данных, снижая тем самым степень влияния инцидентов, связанных с разрушением инфор-

мации, на работу системы. Основное внимание уделено особенностям и методам обеспечения сохранности и восстановления разрушенных данных в распределенных системах обработки данных, построенных на базе территориально распределенных вычислительных сетей (ВС) различного типа (локальных, глобальных, корпоративных и специальных).

В статье также рассмотрены модели и методы повышения степени «реактивности» системы – снижения времени реакции распределенной системы на запросы пользователей и процессов.

1. Причины инцидентов в системах обработки данных и их влияние на бизнес компаний

Природа негативных и разрушающих воздействий на информационные и программные ресурсы систем обработки данных (СОД) может быть самой разной. Это могут быть ошибки персонала, выход из строя аппаратных средств, сбои в программном обеспечении, действия злоумышленников, природные катаклизмы и т.д.

Причины возникновения инцидентов с данными, которые, в свою очередь, приводят, к простоям в работе СОД, можно классифицировать следующим образом [2, 3].

- Сбои в работе оборудования ВС: перебои в системе электропитания, сбои передачи данных в каналах связи, сбои в работе компьютеров (серверов, рабочих станций).

- Отказы аппаратных средств, например, отказы дисковых контроллеров, отказы кэш-памяти, неисправности электроники в дисковых устройствах.

- Ошибки в работе обслуживающего персонала или пользователей системы.

- Потеря информации в системах хранения или архивации, вызванных сбоями оборудования.

- Ошибки во входных и выходных данных, потеря информации, вызванные некорректной работой программного обеспечения, содержащего ошибки.

- Заражение системы компьютерными вирусами.

- Потеря, искажение данных, вызванное несанкционированным доступом в систему.

- Отсутствие или использование не достаточно надежной технологии резервного копирования данных при выполнении таких системных работ, как обновление системного или прикладного программного обеспечения, изменение конфигурации устройств хранения данных, физической структуры распределенной базы данных.

Сбои в работе систем обработки данных и затраты времени на устранение их последствий, приводят к простоям в работе компаний. В результате этих простоев компании несут прямые и косвенные убытки [4].

Прямые убытки это такие убытки, которые могут быть явно подсчитаны на основе конкретных данных, содержащихся в данных финансовой отчетности компании. Некоторые примеры прямых убытков.

- ✓ Потеря производительности труда сотрудников.

- ✓ Упущенные коммерческие возможности компании.

- ✓ Судебные издержки и штрафы за нарушение регуляторных требований.

Для косвенных убытков сложнее подсчитать их денежный эквивалент. Однако они могут оказывать большое негативное воздействие на компанию. К косвенным убыткам можно, например, отнести:

- ✓ Отрицательное влияние на деловую репутацию компаний.

- ✓ Снижение рыночной стоимости компаний.

- ✓ Ухудшение качества обслуживания клиентов.

- ✓ Падение морального состояния персонала компаний и т.д.

За последние несколько лет был выполнен ряд исследований по оценке убытков, вызванных сбоями и простоями в их работе по причине различных инцидентов в информационных системах [5-7].

В исследовании, выполненном Eagle Rock Alliance Ltd [6], приведены результаты опроса ряда компаний. В частности, были собраны оценки стоимости одного часа простоя этих компаний, вызванных сбоями в информационных системах, приведенные в Табл. 1.

Компания EMC опубликовала в 2015 году результаты исследования проблем сохранности данных, которые показывают, например, что

Табл. 1. Стоимость часа простоя компаний

Процент	Величина убытков компаний за час простоя
46%	до \$50,000
28%	от \$51,000 до \$250,000
18%	от \$251,000 до \$1,000,000
8%	более чем \$1,000,000

убытки компаний от потери данных и простоев вычислительной техники составили \$ 1,7 трлн. в течение 12 месяцев 2014 года и что убытки от потери данных возросли на 400% с 2012 года. [8, 9].

Потери компаний от простоев в их работе, вызванные различными инцидентами с сохранностью данных, достаточно серьезны, а иногда и критичны для самого существования компании. В связи с этим появилось новое направление научных исследований - разработка моделей и методов обеспечения сохранности информации методами резервирования и восстановления данных, а затем и методы оптимального распределения резерва данных в узлах распределенных систем. Первые научные работы по этим направлениям у нас в стране и за рубежом появились в шестидесятых-семидесятых годах прошлого века [9–14]. Особенно эти работы активизировались после появления компьютерных сетей и создания на их основе распределенных систем и баз данных [15–20]. Данное направление не потеряло своей актуальности и в настоящее время [21–26].

2. Сохранность информации в автономных системах обработки данных

Первые работы, посвященные методам обеспечения сохранности данных, касались локальных информационных систем, работающих на базе отдельных, автономных компьютеров. В частности, в Институте Проблем Управления РАН были предложены и проанализированы три стратегии оперативного резервирования файлов/массивов данных в системах обработки данных с учетом особенностей их использования и обновления при работе системы [9, 12, 27]. Ниже дано краткое описание данных стратегий, первая из которых применяется для резервирования массивов постоянных данных, содержащих информацию, редко подвергающуюся измене-

ниям (например, справочники различного рода). Вторая и третья стратегии используются применительно к массивам данных, которые содержат информацию, подвергающуюся частым изменениям. Для обеспечения высокого уровня сохранности информации и повышения надежности функционирования в автономной СОД создается оперативный резерв (ОР) массивов данных согласно одной из трех стратегий резервирования.

Стратегия I

Согласно данной стратегии в системе создается оперативный резерв из копий массива постоянных данных. Поведение СОД при обработке запроса (транзакции типа select / insert / update или delete) к массиву данных при использовании данной стратегии резервирования, показано на Рис. 1.

В этом случае в системе имеется основной массив данных F_{00} и хранятся k резервных копий этого массива ($F_{0r}, r = 1, 2, \dots, k$). Предположим, что p - это вероятность того, что массив не будет разрушен за единицу времени его использования при обработке поступившей транзакции. Тогда $q = p - 1$ есть вероятность противоположного события, т.е. вероятность разрушения массива при обработке транзакции. Если массив не используется, то вероятность его разрушения равна нулю.

Если за единичный интервал времени использования копии массива $F_{0r}, r = 1, 2, \dots, (k - 1)$ с вероятностью q она будет разрушена, то очередная его копия ($r + 1$) будет использована в следующем интервале времени для завершения процесса обработки транзакции.

Тогда вероятность успешной обработки транзакции при использовании данной стратегии будет равна: $\rho_t = 1 - q^{k+1}$, а среднее время

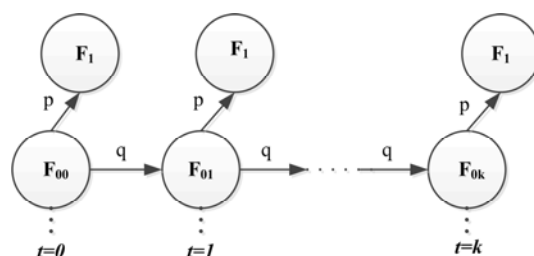


Рис. 1. Стратегия I. Поведение системы при обработке запроса к массиву данных

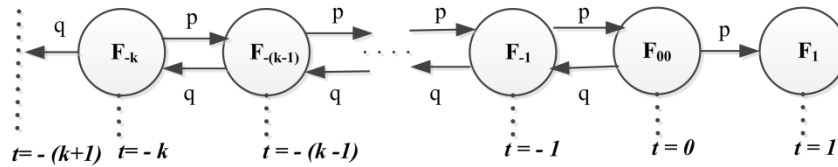


Рис.2. Стратегия II. Поведение системы при обработке запроса к массиву данных

успешной обработки транзакции при использовании основного массива и резервных копий будет равно $E(T_I^*) = \theta p^{-1} \{1 - q^{k+1} [1 + (k+1)p]\}$.

Здесь θ - длительность одной попытки обработки транзакции. Среднее время обработки транзакции, вне зависимости от результата ее обработки, равно: $E(T_I) = \theta p^{-1} (1 - q^{k+1})$.

Стратегия II

При использовании данной стратегии в системе создается резерв из предыстории массива с часто меняющимися данными. Поведение СОД при обработке запроса к такому массиву данных при использовании стратегии II резервирования представлено на Рис. 2.

Поведение системы в данном случае формально описывается как процесс «одномерного дискретного случайного блуждания» [28]. В начальный момент времени процесс (система) находится в точке $(t = 0)$, в которой в системе имеется основной массив данных F_{00} и k предысторий массива данных (F_{-1}, \dots, F_{-k}) .

Под предысторией массива данных здесь понимается предыдущая версия массива вместе с журналом изменений его содержимого (транзакций), выполненных за некоторый интервал времени. В журнал, как правило, заносятся данные об операциях добавления, удаления и изменения данных массива.

Поступивший в СОД запрос к массиву данных (транзакция) может быть успешно обработан с вероятностью p . В этом случае процесс перейдет в точку $(t = 1)$. Однако существует ненулевая вероятность $(q = 1 - p)$ того, что при обработке транзакции массив F_{00} будет разрушен и процесс перейдет в состояние $(t = -1)$. В этом случае делается попытка восстановления разрушенного массива F_{00} с использованием предыстории F_{-1} . В результате массив

F_{00} может быть восстановлен с вероятностью p , и тогда процесс переходит в состояние $(t = 0)$. Однако и сама предыстория F_{-1} при этом может быть разрушена с вероятностью q . В последнем случае процесс перейдет в состояние $(t = -2)$, и будет сделана попытка восстановления предыстории F_{-1} с помощью предыстории F_{-2} и т.д.

Описанный процесс можно трактовать как процесс случайного дискретного блуждания по целочисленной прямой с двумя поглощающими состояниями в точке $(t = 1)$ и в точке $(t = -(k+1))$. Тогда вероятность успешной обработки транзакции при обращении к массиву данных, имеющему резерв из k предысторий, будет равна

$$\rho_{II} = p [p^{k+2} - q^{k+2}]^{-1} [p^{k+1} - q^{k+1}].$$

Среднее время обработки транзакции вне зависимости от результата обработки равно:

$$E(T_{II}) = \left[\frac{\theta}{q - p} \right] \left[k + 1 - (k + 2) \times \frac{1 - (qp^{-1})^{k+1}}{1 - (qp^{-1})^{k+2}} \right].$$

Стратегия III

Третья стратегия объединяет возможности первых двух стратегий резервирования. При этом в системе создается резерв, состоящий как из копий массива данных (x копий), так и из его предысторий (y предысторий). Обработка запроса/транзакции начинается с использованием основного массива F_{00} . Если при этом происходит его разрушение, то для продолжения обработки запроса сначала используются копии массива в соответствии со стратегией I. Если в процессе обработки запроса разрушены все копии (F_{01}, \dots, F_{0x}) , то для продолжения обработки запроса запускается процесс восстановления копии массива F_{0x} с помощью его предысторий в соот-

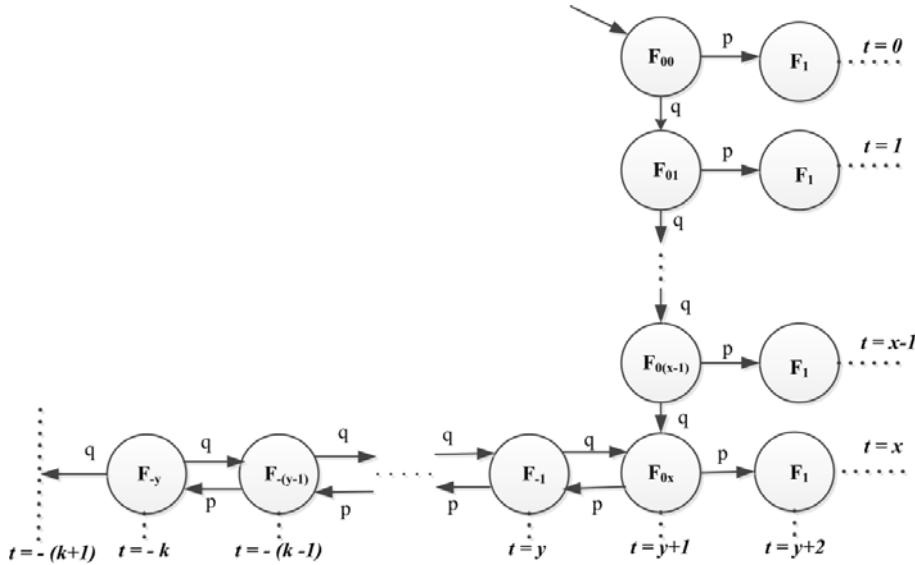


Рис. 3. Стратегия III. Поведение системы при обработке запроса к массиву данных

ветствии со стратегией II. После восстановления копии делается очередная попытка обработки запроса с помощью восстановленной копии.

Поведение системы при обработке запроса к массиву данных при использовании стратегии III показано на Рис. 3.

С учетом вероятностных и временных характеристик стратегий I и II получается, что в случае использования смешанного резерва, созданного в соответствии со стратегией III, вероятность успешной обработки запроса будет равна

$$\rho_3 = 1 - [q^{y+2} - p^{y+2}]^{-1} [q^{x+y+1} (q - p)],$$

а среднее время обработки запроса равно

$$M[T_3] = \theta p^{-1} (1 - q^x) +$$

$$+ \frac{\theta q^x}{q - p} \left[(y - 1) - \frac{(y + 2) [1 - (qp^{-1})^{y+1}]}{1 - (qp^{-1})^{y+2}} \right].$$

В случае если при обработке запроса согласно одной из представленных выше стратегий произошло частичное или полное разрушение резерва (часть или все копии и/или предыстории массива данных разрушены), то восстановление разрушенного резерва производится с помощью специального резерва данных - архива магнитных носителей. Процесс восстановления запускается либо во вне рабочее время, либо в фоновом режиме с малым приоритетом, либо запускается немедленно с высоким приоритетом при полном разрушении резерва.

3. Репликация как средство повышения надежности и производительности распределенных систем

При проектировании и создании РСОД одна из важнейших задач - обеспечение высокой производительности системы и ее надежности. Эффективным методом решения этой задачи является репликация данных, когда создается и поддерживается в актуальном состоянии одна или несколько идентичных копий (реplik) массивов данных. В данном контексте под массивом данных можно понимать файл данных, фрагмент файла данных, таблицу распределенной базы данных (РБД), горизонтальный или вертикальный фрагмент таблицы РБД [29].

Распределение реплик по узлам системы производится таким образом, чтобы максимально приблизить данные к их потребителям (пользователям или приложениям), что позволяет добиться существенного ускорения процесса обработки запросов к данным по сравнению с централизованным хранением информации в компьютерной сети. Помимо увеличения производительности использование реплик позволяет обеспечить и высокую надежность работы системы, так как при отказе одного узла с репликой запросы маршрутизируются в другой работоспособный узел с идентичной репликой.

Идентичность и непротиворечивость данных во всех репликах одного массива данных обеспечивается механизмом репликации изменений, реализуемого средствами информационной системы. Механизм репликации отвечает за то, что при внесении изменений в одну из реплик аналогичные изменения вносятся и во все остальные имеющиеся реплики. В отсутствие корректного механизма репликации реплики в системе не будут идентичны, и тем самым будет нарушена непротиворечивость информации в системе.

Репликация также обеспечивает возможность для масштабирования РСОД. При значительном увеличении интенсивности запросов к репликам в каком-либо сегменте компьютерной сети и существенном замедлении времени реакции системы на запросы можно разместить в данном сегменте сети одну или несколько дополнительных реплик с запрашиваемыми данными.

Тиражирование изменений по всем репликам производится в синхронном режиме или в режиме асинхронной репликации.

Для тиражирования изменений существует три основных метода [30]:

- распространение сообщений об обновлении данных;
- передача измененных данных от одной реплики к другой;
- распространение самой операции обновления по всем имеющимся репликам.

Метод распространения сообщений об обновлении данных в некоторой реплике заключается в том, что другие реплики информируются о том, что имело место обновление данных, и о том, что хранящиеся в них данные стали не актуальны. При этом по сети передается только само сообщение. После получения этого сообщения в узле с неактуальной репликой, прежде чем выполнить любую операцию с данными реплики (чтение, изменение), необходимо сначала обновить эту реплику.

Данный метод целесообразно использовать в ситуации, когда в РСОД количество операций изменения данных существенно превосходит количество операций чтения.

Метод передачи измененных данных от одной реплики к другой применяется в ситуации, когда количество операций чтения существен-

но превосходит количество операций записи в единицу времени.

Третий метод (известный также как метод активной репликации) заключается в том, что измененные данные не пересылаются, а каждой реплике сообщается то, какие изменения ей необходимо произвести со своими данными. В этом случае предполагается, что в каждом узле с репликами функционирует процесс, который отвечает за выполнение операций обновления реплик на основе информации из полученного сообщения.

Преимущество метода заключается в том, что он обеспечивает снижение затрат на передачу информации по компьютерной сети. Недостатком метода является то, что актуализация каждой реплики требует использование ресурсов узла сети, в котором она размещена, а сам процесс актуализации может иметь вероятность успешного завершения меньше единицы.

За повышение производительности и надежности работы системы за счет использования реплик приходится расплачиваться увеличением затрат на функционирование системы (хранение реплик в нескольких узлах сети, затраты на поддержку реплик в идентичном состоянии, увеличение трафика сети за счет тиражирования изменений данных по репликам).

Эти обстоятельства вынуждают проектировщиков и администраторов РСОД искать оптимальный баланс между надежностью и производительностью системы и увеличением затрат на поддержку функционирования системы. Данной проблеме уделяется большое внимание. Это видно по количеству работ по данной тематике как в России, так и за рубежом, например, работы [31-35].

Проблема репликации данных актуальна и для распределенных баз данных, когда для улучшения производительности большие таблицы данных делятся на фрагменты, которые затем распределяются по узлам сети [36, 37].

Методы фрагментирования таблиц баз данных делятся на две большие группы. Первую группу составляют методы горизонтального фрагментирования, согласно которым таблица разбивается на несколько горизонтальных частей - фрагментов, каждый из которых хранит подмножество записей (строк) исходной таблицы. Вторая груп-

па – это методы вертикального фрагментирования, когда производится разбиение исходной таблицы на вертикальные фрагменты. Каждый такой фрагмент содержит некоторое подмножество столбцов (атрибутов) исходной таблицы вместе с первичным ключом. Первичный ключ сохраняется в каждом вертикальном фрагменте, так как он необходим для выборки атрибутов, находящихся в разных фрагментах.

Выделенные одним из указанных методов фрагменты распределяются по узлам компьютерной сети таким образом, чтобы достигался экстремум некоторого критерия оптимальности распределения, например, минимального времени обработки запросов, или минимума трафика запросов пользователей и ответов на них по сети передачи данных.

Можно выделить две разные группы методов решения задач оптимального распределения фрагментов данных в сети: статические методы и динамические методы.

К первой группе относятся алгоритмы решения задач [26, 38], разработанные в предположении о статичном распределении по узлам сети запросов пользователей к фрагментам данных и статической/неизменной во времени частоте возникновения этих запросов. Очевидным недостатком данных алгоритмов является то, что в реальной жизни частота и расположение источников запросов со временем изменяется, что может приводить к деградации характеристик РСОД (в первую очередь это приводит к увеличению времени реакции системы на запросы пользователей и приложений).

Вторая группа методов [4, 26] состоит из более сложных алгоритмов, которые предлагают некие адаптационные механизмы изменения расположения реплик в сети, подстраивающие распределенную систему под изменившиеся условия функционирования, когда частота и расположение узлов-источников запросов к фрагментам данных с течением времени изменяются или меняется топология или характеристики компонент вычислительной сети.

Технология репликации используется в распределенных системах различного назначения. Это могут быть, например, сети CDN (*Content Delivery Network*), предназначенные для ускорения доставки пользователям аудио-, видео-, про-

граммного и других видов цифровой информации [39] или GRID-сети [40], о которых поговорим более подробно ниже в данной работе.

4. Использование реплик в GRID-технологиях

Важной областью использования технологии репликации данных являются Грид (Grid)-технологии, используемые для решения задач, требующих больших вычислительных ресурсов в разных областях: научные и математические задачи, экономическое и сейсмическое прогнозирование и анализ.

Грид-технология это метод распределенных вычислений, который применяется для решения научных, математических задач, требующих значительных вычислительных ресурсов, и базируется на использовании ресурсов сети слабосвязанных компьютеров [41, 42]. Эта технология обеспечивает гибкий, скоординированный совместный доступ к географически распределенным информационным и вычислительным ресурсам, таким как компьютерные ресурсы (вычислительная мощность процессоров и оперативная память), ресурсы хранения информации, сетевые ресурсы, системное и прикладное программное обеспечение.

В GRID сетях информация хранится в базах данных, массивах данных и их репликах. В силу специфики функционирования GRID сетей, вызванной их динамичной природой, возможно использование трех основных способов хранения и использования информации в GRID сети: 1) централизованное хранение информации в единой базе данных; 2) использование множества распределенных по сети фрагментов таблиц баз данных, файлов и их реплик; 3) временное копирование необходимой информации в те узлы сети GRID, где она будет обрабатываться.

Разнообразие вариантов размещения информации по узлам сети GRID требует постановки и решения задач по оптимизации использования вычислительных и информационных ресурсов GRID сетей [40, 42, 43].

Первый, централизованный, способ хранения информации в сети GRID не приводит к большим сложностям при поиске оптимального размещения в одном из узлов сети централизованной БД.

Применительно ко второму, децентрализованному, способу хранения и использования информации кратко рассмотрим один из подходов к решению проблемы оптимального размещения реплик в сети GRID на примере формулировки задачи оптимального размещения, приведенной в работе [43]. Задача поиска оптимального размещения реплик в сети GRID в данной работе сформулирована в форме задачи о покрытии множества (Set Covering Problem - SCP). Цель решения задачи заключается в поиске такого минимального количества узлов системы, в которых размещаются реплики, чтобы обеспечить приемлемое расстояние от каждого узла, в котором возникают запросы, до одного или нескольких узлов с репликой. Данная задача имеет следующую математическую формулировку:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

при условии:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$x_j \in (0, 1), \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

где: $x_j \in (0, 1)$ и $x_j = 1$, если в узле j размещается реплика и $x_j = 0$ в противном случае;

$a_{ij} \in (0, 1)$ и $a_{ij} = 1$, если узел j с размещенной в нем репликой обрабатывает запросы, возникающие в узле i , и $a_{ij} = 0$ в противном случае.

В соответствии с условиями задачи требуется минимизировать количество узлов сети GRID, используемых для размещения реплик (условие (1)). Условие (2) обеспечивает то, что каждый узел, в котором возникают запросы, обслуживается, по крайней мере, одним узлом с репликой. Ограничение (3) определяет то, что для каждого узла системы однозначно определяется, содержит он реплику или нет.

Задачи, принадлежащие классу задач SCP, являются вычислительно сложными. Популярным методом их решения является метод множителей Лагранжа [43, 44].

Третий способ хранения и использования информации наиболее сложен в реализации. Рассмотрим один из возможных вариантов его применения на примере формулировки следу-

ющей задачи оптимизации использования вычислительных и информационных ресурсов сети GRID при обработке задач/запросов [45].

Предположим, что сеть GRID состоит из множества U узлов: $U = \{u_i, i=1, \dots, N^u\}$. В этих узлах хранится множество программных модулей (ПМ) $P = \{p_i, i=1, \dots, N^p\}$ и множество реплик массивов данных (МД) $A = \{a_i, i=1, \dots, N^a\}$. Есть прикладная задача (запрос или процесс) z , решение которой инициируется в некотором узле i сети. Для ее решения используется некоторое подмножество ПМ и реплик МД. Часть массивов данных используется в режиме чтения информации, а другая часть - модифицируется при решении задачи. Для решения задачи в некотором узле сети в этом же узле должны находиться или пересылаться в него/копироваться из ближайших узлов все необходимые для ее решения ПМ и реплики МД. В качестве критериев "близости" узлов могут использоваться, например, следующие показатели: время, надежность или стоимость копирования ПМ или реплики МД.

Целью решения задачи является поиск для задачи z , инициированной в узле i , такого узла j сети, в котором она будет решена наиболее оптимальным образом. В качестве критерия оптимальности можно использовать минимум стоимостных затрат на решение задачи z , максимум вероятности успешного ее решения или минимум времени решения задачи z .

Сформулируем постановку данной оптимизационной задачи с использованием в качестве критерия оптимизации минимума времени T решения прикладной задачи.

Введем обозначения:

- V_i^p ($i=1, \dots, N^p$) – объем программного модуля p_i ,

- V_i^a ($i=1, \dots, N^a$) – объем реплики массива данных a_i ,

- t_{ij}^o ($i, j=1, \dots, N^u$) – пропускная способность канала связи между узлами i и j ($t_{ij}^o = t_{ji}^o$).

- $r_i \in \{0, 1\}$ и $r_i = 1$, если программный модуль p_i используется при решении задачи z .

- $y_i^R, y_i^W \in \{0, 1\}$ и $y_i^R = 1$, если массив данных a_i считывается, а $y_i^W = 1$, если a_i модифицируется при решении задачи z .

Если реплика МД подлежит обновлению, то после завершения решения задачи измененная реплика этого массива данных копируется во все узлы, где расположены другие реплики этого массива данных, для поддержки достоверности данных в сети.

Пусть заданы матрицы X и Y размещения реплик МД и копий ПМ по узлам сети GRID:

- $X=[x_{ij}]; i=1, \dots, N^a; j=1, \dots, N^u; x_{ij} \in \{0,1\}$ и $x_{ij}=1$, если реплика МД a_i размещена в узле u_j ;

- $Y=[y_{ij}]; i=1, \dots, N^p; j=1, \dots, N^u; y_{ij} \in \{0,1\}$ и $y_{ij}=1$, если копия ПМ p_i размещена в узле u_j .

Задан вектор $t=(t_j, j=1, \dots, N^u)$, где t_j – среднее «чистое» время решения задачи z в узле u_j (без учета времени пересылки в узел реплик массивов данных и копий программных модулей, используемых при решении задачи).

В результате решения задачи оптимизации необходимо определить вектор $\Psi=(\psi_i; i=1, \dots, N^u); \psi_i \in \{0,1\}$, где $\psi_i=1$, если задача z решается в узле u_i сети.

Используя полученные обозначения, получим, что время $T(\Psi)$ решения задачи z определяется по формуле:

$$T(\Psi) = \sum \psi_i * T_i.$$

Здесь суммирование проводится по всем $i=1, \dots, N^u$ узлам сети, а T_i – среднее время решения задачи z в узле u_i с учетом времени на пересылку в узел i требуемых задаче реплик массивов данных и программных модулей (предположим, что реплики МД и копии ПМ пересылаются в узел i и записываются на его устройства хранения последовательно).

Очевидно, что должно учитываться ограничение на количество узлов для решения задачи: $\sum \psi_i = 1$ (суммирование по $i=1, \dots, N^u$).

Тогда время T_i определяется следующим образом:

$$T_i = t_i + \sum_{j=1, N^p} r_i * t_{jil}^p + \sum_{j=1, N^a} y_j^r * t_{jil}^a + \\ + \sum_{j=1, N^a} y_j^w * t_{jil}^a + \sum_{j=1, N^a} y_j^w * t_{ji}^c,$$

где t_{jil}^p – время пересылки массива j в узел i из узла l , номер которого определяется в соответствии с критерием “близости” к узлу i , в котором решается задача. В качестве критерия “близости” будем использовать минимум времени пересылки МД или ПМ из узла l в узел i . Т.е. для узла с номером l должно обеспечиваться достижение следующих минимумов (для пересылки ПМ и ИМ соответственно):

$$t_{jil}^p = \min_{n=1, N^u} (y_{jn} * v_j^p / t_{ni}^o); t_{jil}^a = \min_{n=1, N^u} (x_{jn} * v_j^a / t_{ni}^o).$$

Значение времени рассылки по узлам сети массива a_j , измененного в узле u_i при решении задачи, определяется по формуле:

$$t_{ji}^c = \sum (x_{jn} * v_i^a / t_{in}^o), \text{ суммирование по } n=1, \dots, N^u.$$

В качестве ограничения в рассматриваемой задаче будем использовать ограничение на вероятность $\rho(\Psi)$ успешного решения задачи в GRID сети. Будем считать, что сбой при решении задачи может возникнуть при исполнении программных модулей в узле сети u_j , при пересылке в узел u_j необходимых МД и ПМ и при рассылке из узла u_j измененных реплик МД в узлы сети, где хранятся их реплики, подлежащие замене.

Вероятность успешного решения задачи рассчитывается по формуле:

$$\rho(\Psi) = \sum \psi_i * \rho_i * \rho_i^p * \rho_i^a * \rho_i^{ac}, (i=1, N^u),$$

где: ρ_i – вероятность успешного исполнения за-

дачи в узле i ; ρ_i^a – вероятность успешной передачи в узел i всех необходимых для решения задачи ПМ и МД; ρ_i^{ac} – вероятность успешной рассылки измененных реплик МД. Значения этих вероятностей рассчитываются с учетом пропускных способностей t^0 каналов связи, объемов пересылаемых МД и ПМ и вероятностей ρ_{ij} безотказной работы канала связи между узлами i и j за единицу времени передачи данных. Эти вероятности равны 1 при $\psi_i=0$, а при $\psi_i=1$ рассчитываются по формулам:

$$\rho_i^p = \prod_{j=1, N^p} * \prod_{n=1, N^u, y_{jn}=1} \rho_{ni}^b; b = v_j^p / t_{ni}^o$$

$$\rho_i^a = \prod_{j=1, N^a, y_j^r + y_j^w > 0} * \prod_{n=1, N^u, x_{jn}=1} \rho_{ni}^s; s = v_j^a / t_{ni}^o$$

$$\rho_i^{ac} = \prod_{j=1, N^a, y_j^w=1} * \prod_{n=1, N^u, x_{jn}=1} \rho_{ni}^d; d = v_j^a / t_{ni}^o$$

Тогда данная задача выбора оптимального узла для решения задачи z формулируется следующим образом:

$$T \rightarrow \min T(\Psi), \text{ при ограничении } \rho(\Psi) \geq \rho^*$$

Возможна постановка задачи максимизации вероятности успешного решения задачи z при ограничении на среднее время ее решения, т.е.

$$\rho \rightarrow \max \rho(\Psi), \text{ при ограничении } T(\Psi) \leq T^*$$

Обобщением сформулированных задач оптимизации является задача, при решении которой необходимо определить матрицу $\Psi = [\psi_{ij}]$ оптимального распределения по узлам GRID сети не одной, а множества $Z = (z_i)$ задач, совместно использующих размещенные в узлах сети МД и ПМ. При формулировке данной задачи оптимизации необходимо учитывать интенсивности λ_i поступления заявок на решение задач (обработку запросов), время ожидания в очереди на обслуживание в узле сети, возможность использования одного МД и/или ПМ несколькими задачами.

Данные задачи рассматриваются при условии известного распределения копий МД и ПМ по узлам сети.

Возможна постановка обратной задачи оптимизации, когда для каждой задачи z_i известен узел, в котором она решается, и необходимо найти оптимальное распределение копий ИМ и ПМ в GRID сети.

Возможна постановка более общих задач по поиску оптимального распределения как реплик МД и ПМ по узлам GRID сети, так и распределения множества задач Z для их решения по узлам сети, обеспечивающих минимум среднего времени решения задач, максимум вероятности их успешного решения или достижения других критериев оптимизации (например, минимум стоимости хранения информации в узлах сети и передачи ее между узлами GRID сети).

5. Обеспечение сохранности информации в распределенных системах методами резервирования

Размещение реплик в узлах вычислительной сети, как было сказано выше, позволяет повысить надежность и производительность распределенной системы. Еще большего повышения надежности работы распределенных систем и сохранности используемых в них данных можно добиться за счет использования в узлах с репликами дополнительной информационной избыточности. В частности, в Институте проблем управления РАН разработана методология повышения надежности РСОД, функционирующих на основе ненадежных компьютерных сетей, за счет размещения в узлах сети не только реплик массивов данных, но и дополнительного резерва в виде копий и/или предыстории этих реплик. Размещенный в узле сети резерв используется для продолжения обработки запросов в случае разрушения основной реплики массива данных в данном узле. Резерв создается в узлах сети с репликами согласно одной из трех описанных выше стратегий резервирования. При этом учитываются особенности их применения в среде распределенной системы [15].

Расчет временных, вероятностных и стоимостных характеристик стратегий резервирования производится на основе формальной модели, описывающей размещение в РСОД нескольких реплик каждого массива данных совместно с резервом из копий и/или предыстории реплик. Определение характеристик стратегий проводится при условии статичного трафика запросов к репликам, ненулевой вероятности сбоя при передаче сообщений по каналам связи, а также ненулевой вероятности разрушения реплики и резерва при обработке запроса в узлах сети.

Используются следующие предположения: во всех узлах с репликами и размещенным в них резервом используется одна и та же стратегия резервирования, резерв во всех узлах имеет одинаковый объем (одинаковое количество копий и/или предыстории), задержка сообщений одинакова по всей сети. Достоверность данных в репликах обеспечивается тем, что запросы на модификацию данных одновременно пересылаются

для обработки во все узлы с репликами. Информационные запросы к репликам обрабатываются согласно одной из четырех дисциплин [21]: 1 – запрос адресуется в ближайший узел с резервом; 2 - запрос пересылается для обработки одновременно в K узлов с репликой; 3 – запрос пересылается по пути длиной N , состоящего из узлов с репликой; 4 - запрос поочередно адресуется в M ближайших узлов с репликой.

С использованием теории вероятностей и, в частности, модели случайного блуждания частицы по целочисленным точкам действительной прямой с двумя поглощающими экранами [28] получены аналитические выражения для расчета характеристик стратегий резервирования и четырех дисциплин обработки запросов при их использовании в узлах РСОД, которые приведены в работе [21].

В частности, характеристики стратегий резервирования при децентрализованном хранении резерва и использовании дисциплин 1 и 2 для обработки запросов, приведены в Табл. 2.

В таблице использованы следующие обозначения:

ρ_j – надежность обработки запроса, т. е. вероятность получения ответа на запрос, выданный в j -м узле сети;

t_j – время получения ответа на запрос, выданный в j -м узле;

t_3 - среднее время задержки сообщений в сети;

r_{jk} – надежность канала связи между j -м и k -м узлом;

$P_k(x_k)$ – вероятность успешной обработки запроса в узле k при размещении в этом узле резерва объемом x_k (*);

$E_k(x_k)$ – среднее время обработки запроса в узле k , имеющего резерв объемом x_k (*);

$\psi_{jk} \in \{0, 1\}$ и $\psi_{jk} = 1$, если запрос из узла j пересылается для обработки в узел k ;

U_j – интенсивность возникающих в узле j информационных запросов;

V_j – интенсивность возникающих в узле j запросов на модификацию данных;

ZP – средние затраты на использование ресурсов ВС для обработки запросов при условии их успешной обработки (**);

Z – величина средних непроизводительных затрат на использование ресурсов ВС для обработки запросов (**);

$Z_{jk}(x_k)$ – средние непроизводительные затраты ресурсов сети, затраченных на неуспешную обработку запроса, посланного из j -го узла для обработки в k -й узел (**);

$ZP_{jk}(x_k)$ – средние затраты ресурсов ВС, затраченных на успешную обработку запроса, посланного из j -го узла для обработки в k -й узел (**).

Примечание:

(*) – расчет значения данной характеристики дисциплины проводится по соответствующей формуле, приведенной в разделе 2.

(**) – формулы для расчета значения данной характеристики дисциплины приведены в работе [21].

Табл. 2. Характеристики стратегий резервирования

Дисциплина	Вероятностные и временные характеристики	Стоимостные характеристики
1	$\rho_j = \sum_{k=1}^N r_{jk} P_k(x_k) r_{kj} \psi_{jk}$	$Z = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (U_j \psi_{jk} + V_j y_k) Z_{jk}(x_k)$
	$t_j = 2t_3 (1 - \psi_{jj}) + \sum_{k=1}^N E_k(x_k) \psi_{jk}$	$ZP = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (U_j \psi_{jk} + V_j y_k) ZP_{jk}(x_k)$
2	$\rho_j = 1 - \prod_{k=1}^N [1 - r_{jk} P_k(x_k) r_{kj} \psi_{jk}]$	$Z = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (U_j \psi_{jk} + V_j y_k) Z_{jk}(x_k)$
	$t_j = \max \left\{ 2t_3, \max_{k \in N; k \neq j} E_k(x_k); E_j(x_j) \psi_{jj} \right\}$	$ZP = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (U_j \psi_{jk} + V_j y_k) ZP_{jk}(x_k)$

Приведенные аналитические выражения для расчета характеристик дисциплин обработки запросов при использовании разных стратегий резервирования реплик позволяют формулировать задачи оптимального распределения по узлам распределенной системы реплик массивов данных вместе с резервом из копий и/или предысторий.

Большое количество различных вариантов размещения реплик по узлам вычислительной сети обеспечивает различные характеристики функционирования РСОД и, следовательно, приводит к необходимости решения задачи поиска оптимального распределения реплик и резерва массивов данных по узлам РСОД. При этом можно использовать различные критерии оптимальности распределения реплик и оперативного резерва: вероятностные, временные критерии и стоимостные критерии. Для решения таких задач предложен эвристический алгоритм, состоящий из двух этапов. На первом этапе ищется близкое к оптимальному множество узлов РСОД для размещения реплик. На втором этапе для повышения надежности РСОД определяется оптимальный объем резерва копий и/или предысторий массивов данных, который размещается во множестве узлов РСОД с репликами, определенным на первом этапе решения задачи.

Например, задача поиска оптимального размещения реплик и оперативного резерва в узлах ВС, обеспечивающего минимум стоимостных затрат $S(X)$ на функционирование РСОД (стоимость обработки поступающих запросов и хранения реплик и резерва) формулируется таким образом:

$$S(X) \rightarrow \min \tag{4}$$

при следующих ограничениях на время t_j обработки запросов, вероятность ρ_j получения ответа на запрос и на размер x_j резерва в узлах сети:

$$t_j(X) \leq \bar{t}; (j \in J_3) \tag{5}$$

$$\rho_j(X) \geq \bar{\rho}; (j \in J_3) \tag{6}$$

$$x_j \leq \bar{x}_j; (j \in I^o) \tag{7}$$

Здесь J_3 - это множество индексов узлов ВС, в которых возникают запросы; $I^o = \{i / y_i = 1\}$ - множество узлов ВС, в которых размещен опе-

ративный резерв и реплики; $X = (x_j)$ - распределение резерва по узлам сети, где x_j - число копий и/или предысторий, размещенных в узле j ; \bar{x}_j - максимальное количество копий и/или предысторий массива данных, которое можно разместить в узле j вместе с репликой.

Значение затрат $S(X)$, например, для дисциплин 1 и 2 обработки запросов будет определяться по формуле:

$$S(X) = L \sum_{i \in I^o} S_i x_i + L \sum_{i \in I^o} S_i + \sum_{j=1}^N \sum_{i \in I^o} ZP_{ji}(x_i) (U_j \psi_{ji} + V_j). \tag{8}$$

Здесь: второе слагаемое в формуле (8) это стоимость хранения реплик; $\psi_{ji} \in \Psi^o$; матрица $\Psi^o = \|\psi_{ji}^o\|$, где $\psi_{ji}^o \in \{0,1\}$ и $\psi_{ji}^o = 1$, если запрос из j -го узла адресуется в i -ый узел, S_i - стоимость хранения одного бита информации в узле i ; L - длина массива данных/реплики в битах; $U_j(V_j)$ - интенсивность информационных запросов (запросов на модификацию), возникающих в узле j ; $ZP_{ji}(x_i)$ - величина средних производительных затрат на обработку запроса, посланного из узла j на обработку в узел i . Данная величина рассчитывается по следующей формуле:

$$ZP_{ji}(x_i) = 2D_{ji} + E_i(x_i)h_i,$$

где: $E_i(x_i)$ - среднее время обработки запроса в узле i ; D_{ji} - стоимость передачи запроса/ответа из узла j в узел i (предполагается, что $D_{ji} = D_{ij}$); h_i - стоимость использования ресурсов ЭВМ узла i в единицу времени.

Значения величин $t_j(X), \rho_j(X)$ для дисциплин 1 и 2 определяются по формулам, приведенным выше в Табл. 1.

В работе [46] показано, что сформулированная выше задача (4) - (7) поиска оптимального оперативного резерва принадлежит классу задач целочисленного выпуклого программирования. Это утверждение основывается на доказательстве выпуклости ограничений (5) - (7) и целевой функции $S(X)$. Достаточным услови-

ем для совпадения локального и глобального минимума целевой функции задачи является выпуклость функций $S(X), t_j(X), \rho_j(X)$. Аналогично доказывается, что к классу задач целочисленного выпуклого программирования принадлежат и задачи поиска оптимального размещения реплик и оперативного резерва, использующие в качестве критериев оптимизации максимум вероятности успешной обработки запросов (задача (9) - (12)) или минимум среднего времени получения ответа на запрос (задача (13) - (16)). Формулировки этих задач приведены ниже:

$$\text{Найти: } \max R(X) = \max \prod_{j \in J_s} \rho_j(X) \quad (9)$$

при ограничениях:

$$S(X) \leq \bar{S}; \quad (10)$$

$$t_j(X) \leq \bar{t}_j; (j \in J_s) \quad (11)$$

$$x_j \leq \bar{x}_j; (j \in I^o) \quad (12)$$

$$\text{Найти: } \min T(X) = \min N_s^{-1} \sum_{j \in J_s} t_j(X) \quad (13)$$

при ограничениях:

$$S(X) \leq \bar{S}; \quad (14)$$

$$\rho_j(X) \geq \bar{\rho}_j; (j \in J_s) \quad (15)$$

$$x_j \leq \bar{x}_j; (j \in I^o) \quad (16)$$

Здесь $N_s = |J_s|$.

Приведенные выше задачи оптимального распределения по узлам сети оперативного резерва и реплик массивов данных обладают большой вычислительной сложностью. Поэтому предлагается решать задачи в два этапа [46]. На первом этапе определяется оптимальное размещение реплик по узлам ВС - I^o (не более одной реплики в каждом узле). Это размещение получается в результате решения данных задач с помощью известных алгоритмов [34, 36, 39, 40, 47-49]. Например, в [49] предложен эвристический алгоритм, который обеспечивает нахождение решений, близких к оптимальному.

Если найденное на первом этапе размещение реплик не обеспечивает выполнение ограничения (6) задачи, т.е. не обеспечивает требуемую вероятность обработки запросов $\bar{\rho}$, то переходят ко второму этапу решения задачи, на кото-

ром производится размещение в узлах с репликами дополнительного оперативного резерва массива данных. На втором этапе для каждого узла множества I^o решается задача определения оптимального объема оперативного резерва в отдельном узле ВС. Для решения этой задачи используются традиционные методы (методы решения задач распределения ограниченных ресурсов) [50, 51].

Использование двух этапов решения задач оптимального распределения реплик и оперативного резерва массивов данных в РСОД позволяет существенно уменьшить вычислительную сложность задач. Это уменьшение обеспечивается тем, что вместо одной вычислительно сложной задачи решаются две существенно более простые задачи. Решение первой из них определяет подмножество узлов РСОД, в которых необходимо разместить реплики массивов данных. А вторая задача позволяет определить объем оперативного резерва, размещаемого во множестве узлов с репликами, определенном на первом этапе решения задачи.

6. Восстановительное резервирование

Размещение в узлах распределенных систем реплик и дополнительного резерва данных в виде копий и/или предысторий массивов данных значительно снижает, но полностью не исключает вероятность разрушения информации в одном или нескольких узлах РСОД. Естественно, что это обстоятельство приводит к более или менее существенному снижению показателей эффективности работы не только того сегмента сети, в котором один узел или несколько узлов стали неработоспособными. Это вызывает снижение эффективности работы и всей системы в целом.

К настоящему времени на российском рынке представлено большое количество IT-компаний, успешно действующих в области резервного копирования данных и предлагающих большое количество разнообразных технических и программных решений, предназначенных для обеспечения сохранности, доступности, достоверности и восстановления данных [52-54].

Задача обеспечения сохранности данных в крупномасштабных распределенных системах

обработки данных, имеющих большое количество узлов, распределенных на больших территориях, и которые могут быть географически удалены друг от друга на большие расстояния, требует наличия формальных моделей и методов, позволяющих находить оптимальное применение решений по резервному копированию и восстановлению информации.

Формальные модели использования резервирования данных и их репликации были рассмотрены выше в данной работе.

В данном разделе рассмотрим формальные модели и методы восстановления разрушенной информации, разработанные в Институте проблем управления РАН [55-58]. Работы в этом направлении ведутся и в настоящее время [59, 60]. Данные модели позволяют формулировать и решать задачи поиска оптимальных методов восстановления информации в РСОД.

Для восстановления разрушенных реплик массивов данных и их резерва в виде копий и предыстории было предложено применять особый вид резервирования - восстановительное резервирование. Основная идея данного вида резервирования заключается в том, что для восстановления разрушенной в узле РСОД информации предлагается использовать специальное дополнительное количество копий и/или предыстории реплик массивов данных.

Особенности резервирования массивов данных в РСОД определяют возможность использования двух типов восстановительного резервирования.

- Первый тип заключается в том, что в качестве восстановительного резерва (ВР) используется неразрушенная информация узла РСОД, ближайшего к узлу с разрушенными данными. При этом предполагается, что в РСОД используется децентрализованный вариант резервирования копий и предыстории массивов данных. Близость узлов вычислительной сети определяется согласно некоторому критерию близости.

- Второй тип предполагает, что в качестве ВР для целей восстановления разрушенных массивов данных используется специальный резерв - архив магнитных носителей (АМН). АМН предназначен для длительного и надежного хранения массивов данных, которые используются исключительно для целей обработки запросов на

восстановление разрушенных данных. АМН может располагаться в одном (централизованный вариант архива) или нескольких узлах РСОД (децентрализованный вариант).

Предложены две стратегии восстановления разрушенной информации в узле РСОД на основе восстановительного резерва: стратегия В-1 и стратегия В-2. Согласно первой стратегии при помощи ВР последовательно получают все копии и реплики, разрушенные в узле РСОД. Согласно стратегии В-2 при получении очередной копии или реплики, в отличие от стратегии В-1, наравне с информацией из ВР используются все ранее полученные (восстановленные) копии, реплики массива данных восстанавливаемого узла РСОД.

В случае разрушения в РСОД резерва, содержащего предыстории массива данных, для восстановления информации в узле сети можно, на основе восстановительного резерва, получить дубли всех, нескольких или только последней предыстории массива. Затем эти дубли пересылаются в узел с разрушенными данными. Этот вариант был подробно рассмотрен в работе [61], поэтому в этой статье на нем останавливаться не будем, и далее будем считать, что разрушенный резерв данных состоит только из копий и реплик массива данных, без предыстории.

Рассмотрим процесс восстановления разрушенных данных в некотором узле РСОД согласно первому типу восстановительного резервирования.

Предположим, что узел РСОД содержит резерв из n копий массива данных, а в качестве ВР используется неразрушенный резерв ближайшего узла сети, созданный в соответствии со стратегией I оперативного резервирования из m копий (стратегия I и ее характеристики описаны ранее в данной статье).

Определим характеристики восстановительной стратегии В-1. Согласно данной стратегии каждая очередная копия массива данных для восстановления разрушенного в узле РСОД резерва (n копий массива) получается из m -й копии массива из восстановительного резерва. При этом сама m -я копия массива также может быть разрушена с вероятностью γ ($\gamma = 1 - \beta$). В этой ситуации начинается восстановление разрушенной m -й копии путем снятия копии с $(m - 1)$ -ой ко-

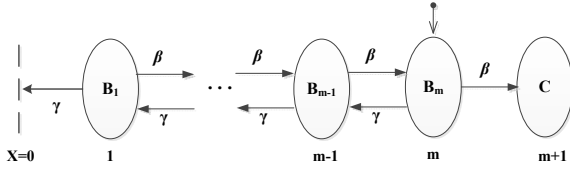


Рис. 4. Стратегия В-1. Процесс получения очередной копии

пии массива из ВР. Копия $(m - 1)$ в свою очередь также может быть разрушена и т.д.

На Рис. 4 показан вероятностный процесс получения одной копии массива согласно стратегии В-1 с учетом вероятности разрушения копий восстановительного резерва.

Данный процесс восстановления описывается формальной моделью случайного блуждания частицы по целочисленным точкам действительной прямой (с двумя поглощающими экранами в точках $x = 0$ и $x = m - 1$) [28]. Если частица попадает в точку $x = 0$, то это соответствует разрушению всех копий массива в узле с восстановительным резервом B_1, \dots, B_m . Если же частица попадает в точку $x = m + 1$, то это означает успешное завершение процесса восстановления, т.е. получение очередной копии для восстановления разрушенного резерва в узле РСОД.

В соответствии с моделью случайного блуждания частица из начальной точки $x = z$ может попасть в точку $x = 0$ с вероятностью, равной:

$$q_z = (b^{m+1} - b^z)(b^{m+1} - 1)^{-1}, \text{ где } b = \gamma/\beta.$$

Вероятность того, что частица перейдет из состояния $x = z$ в состояние $x = m + 1$ равна:

$$p_z = 1 - q_z = (1 - b^z)(1 - b^{m+1})^{-1}$$

В рассматриваемом нами случае $z = m$, следовательно, вероятность P_1^I успешного получения одной копии для восстановления разрушенного резерва в узле РСОД будет равна:

$$P_1^I = (1 - b^m)(1 - b^{m+1})^{-1}$$

Представленная ниже формула (17) описывает вероятностный процесс поведения системы, состоящей из двух узлов (узел с разрушенным резервом и узел с восстановительным резервом) в ходе восстановления всех n разрушенных копий ОР:

$$(P_1^I)^n + (P_1^I)^{n-1}Q_1^I + P_1^IQ_1^I + Q_1^I = 1, \quad (17)$$

где $Q_1^I = 1 - P_1^I$

Модель случайного блуждания частицы по целочисленным точкам позволяет определить и среднее время перехода частицы из состояния $x = m$ в состояние $x = (m + 1)$, т.е. среднее вре-

мя E_1^I получения одной копии массива данных, которое в нашей ситуации будет равно [28]:

$$E_1^I = C_1[(m + 1)(1 + b^{m+1})(1 - b^m) - m(1 - b^{m+1})(1 + b^m)]\tau \quad (18)$$

Здесь:

- τ - среднее время копирования копии массива данных восстановительного резерва;
- $C_1 = (\beta - \gamma)^{-1}(1 - \beta^{m+1})^{-2}$.

Однако существует ненулевая вероятность ситуации полного разрушения всех копий ВР в процессе восстановления одной копии. Разрушение ВР при этом может произойти за среднее время \bar{E}_1^I [28]:

$$\bar{E}_1^I = C_1\beta^m[(m + 1)(1 + \beta^{m+1})(1 - \beta) - (1 - \beta^{m+1})(1 + \beta)]\tau \quad (19)$$

На основе формул (17) - (19) мы можем получить следующие характеристики стратегии восстановительного резервирования В-1:

- ρ_{B-1}^I и E_{B-1}^I - вероятность и среднее время, затраченное на успешное получение n копий для восстановления ОР;
- σ_{B-1}^I и \bar{E}_{B-1}^I - вероятность и среднее время неуспешного получения копий (т.е. вероятность и время до разрушения ВР в процессе получения копий);
- T_{B-1}^I - среднее время работы системы при получении n копий.

В Табл. 3 приведены перечисленные выше характеристики восстановительной стратегии В-1.

Характеристики восстановительной стратегии В-2 получаются аналогичным образом.

Как было сказано в начале данного раздела, особенности размещения данных в РСОД предполагают возможность использования двух типов восстановительного резервирования. Согласно первому типу в качестве ВР используется неразрушенный резерв данных ближайшего узла РСОД. Во втором варианте используется архив

Табл. 3. Характеристики стратегии В-1

Характеристики восстановительной стратегии	
ρ_{B-1}^I	$[(1 - b^m)(1 - b^{m+1})^{-1}]^n$
σ_{B-1}^I	$1 - \rho_{B-1}^I$
E_{B-1}^I	nE_1^I
\bar{E}_{B-1}^I	$\bar{E}_1^I + E_1^IP_1^I(\sigma_{B-1}^IQ_1^I)^{-1}[1 - (P_1^I)^{n-1}]$
T_{B-1}^I	$(E_1^IP_1^I + \bar{E}_1^IQ_1^I)\sigma_{B-1}^IQ_1^{I-1}$

магнитных носителей, который специально предназначен для целей восстановления данных.

Масштабность и территориальная распределенность РСОД, большое количество узлов, предназначенных для хранения и обработки информации, обуславливает большое количество разнообразных вариантов размещения ВР в узлах системы. Из этого большого количества вариантов необходимо выбрать тот, который обеспечит оптимальное значение используемого критерия оптимальности.

Рассмотрим постановку задачи оптимального восстановительного резервирования в среде РСОД.

Для первого типа восстановительного резервирования необходимо для каждого j -го узла сети, имеющего размещенный в нем резерв данных, выбрать другой узел i резерв данных которого будет использоваться для восстановления узла j в случае разрушения в нем информации. При этом должен достигаться экстремум выбранного критерия оптимальности. В качестве такого критерия могут использоваться несколько следующих критериев: максимум вероятности успешного восстановления данных, минимум среднего времени восстановления данных, минимум стоимостных затрат на восстановление разрушенных данных.

Рассмотрим следующий алгоритм восстановления разрушенной информации в узле j . В первую очередь находится ближайший узел с неразрушенным резервом данных. Затем при помощи данных этого узла согласно стратегии В-1 или В-2 получается копия разрушенного массива данных, которая пересылается в узел j , где с нее снимаются другие копии в количестве $(m_j - 1)$, необходимым для полного восстановления данных узла j . Здесь m_j - объем резерва (количество копий массива данных), размещенного в рассматриваемом узле j .

Универсальным критерием оптимальности восстановительного резервирования информации в РСОД, построенных на базе вычислительных сетей, является стоимостный критерий. Согласно данному критерию целью решения задачи оптимизации является минимизация стоимостных затрат на восстановление разрушенного резерва данных. При использовании данного критерия задача оптимального

восстановительного резервирования для первого типа восстановления будет иметь следующую формулировку:

Необходимо найти такие значения переменных ψ_{ji} ($\psi_{ji} = 1$, если резерв данных j -го узла восстанавливается при помощи резерва, имеющегося в узле i , и $\psi_{ji} = 0$ в противном случае), чтобы:

- 1) вероятность восстановления резерва данных каждого узла РСОД в случае его разрушения была не меньше определенной величины;
- 2) время восстановления резерва разрушенного узла не превышало определенного лимита;
- 3) стоимостные затраты на восстановление резерва во всей системе были минимальны при обязательном выполнении условий 1), 2).

Следовательно, формально задача поиска оптимального восстановительного резервирования для первого типа восстановления в РСОД имеет следующий вид:

$$S(\Psi) \rightarrow \min \tag{20}$$

При ограничениях:

$$P_j \geq \bar{P}; \tag{21}$$

$$E_j \geq \bar{E}; \tag{22}$$

$$\sum_{\substack{i \in J_p, \\ i \neq j}} \psi_{ji} = 1; \tag{23}$$

$$j \in J_p \tag{24}$$

Здесь: $\Psi = \|\psi_{ji}\|$; P_j - вероятность восстановления резерва j -го узла системы, а E_j - среднее время восстановления резерва узла j , которые вычисляются по формулам (26), (27) представленным ниже. Величина $S(\Psi)$ стоимостных затрат на восстановление резерва определяется по формуле (25):

$$S(\Psi) = \sum_{j \in J_p} \lambda_j \{ h_j (m_j - 1) \tau_j + \sum_{\substack{i \in J_p, \\ i \neq j}} \psi_{ji} [L_3 d_{ji} + T_i h_i + L d_{ij}] \} \tag{25}$$

$$P_j = \sum_{\substack{i \in J_p, \\ i \neq j}} \psi_{ji} r_{ji} \rho_i r_{ij} \beta_j^{(m_j - 1)} \tag{26}$$

$$E_j = \sum_{\substack{i \in J_p, \\ i \neq j}} \psi_{ji} [2t_3 + T_i + t_{ij} + (m_j - 1) \tau_j] \tag{27}$$

Здесь:

- L - длина массива данных в битах;
- d_{ji} - стоимостные затраты на пересылку одного бита информации из j -го в i -ый узел;

- T_i - среднее время получения одной копии массива данных при помощи восстановительного резерва узла i (вычисляется по соответствующим формулам для восстановительной стратегии В-1 или В-2);
- l_3 - длина запроса на восстановление, пересылаемого по сети;
- J_p - множество индексов узлов сети, в которых размещен резерв данных;
- λ_j - интенсивность разрушений резерва узла j , равная $\lambda_j = (U_j + V_j)\sigma_j$, где σ_j – это вероятность разрушения резерва узла j при обработке одного запроса к данным (определяется по формулам, соответствующим стратегиям I, II и III оперативного резервирования. Раздел 2 данной статьи);
- τ_j - время копирования массива данных в узле j ;
- ρ_i - вероятность успешного восстановления в узле i одной копии массива данных средствами восстановительной стратегии В-1 или В-2;
- β_j - вероятность успешного копирования в узле j ;
- t_{ij} - среднее время пересылки по каналам связи из i -го в j -ый узел одной копии массива данных.

Заменяв функцию $S(\Psi)$ на функцию $W(\Psi)$, мы получим:

$$W(\Psi) = \sum_{j \in J_p} \lambda_j \left\{ h_j(m_j - 1)\tau_j + \sum_{i \in J_p, i \neq j} \psi_{ji}\omega_{ji} \right\}$$

где $\omega_{ji} = -[l_3 d_{ji} + T_i h_i + L d_{ij}]$,

С помощью такой замены мы переходим от решения задачи (20)-(24) к решению задачи поиска паросочетания с максимальным весом, в которой в качестве веса дуги рассматривается величина ω_{ji} . Данная задача формулируется следующим образом:

Необходимо найти:

$$\max W(\Psi) = \sum_{j \in J_p} \lambda_j h_j(m_j - 1)\tau_j + \max \sum_{j \in J_p} \lambda_j \sum_{i \in J_p, i \neq j} \psi_{ji}\omega_{ji}$$

при ограничениях (21)-(24).

Для решения этой задачи можно использовать алгоритм Эдмондса и Джонсона [67].

Таким образом, в данном разделе нами рассмотрены формальные модели и методы использования восстановительного резервирования в распределенных системах обработки данных. Применение данных методов особенно актуально в РСОД, построенных на основе крупномасштабных ненадежных вычислительных сетей, т.к. они позволяют выбрать оптимальный метод восстановления разрушенных массивов данных, которое может произойти по разным причинам.

7. Использование структурно-технологического резерва в распределенных системах

В области систем обработки данных давно появились и интенсивно развиваются два разнонаправленных, но взаимодополняющих друг друга направления:

- системы, ориентированные на операционную обработку данных и
- системы, ориентированные на анализ данных - системы поддержки принятия решений.

Первоначально появились и интенсивно развивались системы, ориентированные на операционную обработку данных (транзакционные системы). Главная их цель – производительность и надежность обработки транзакций.

Затем возникла необходимость анализа больших объемов данных, накопленных в транзакционных системах. Однако структура данных таких систем была ориентирована исключительно на достижение высокой скорости обработки транзакций, а не на агрегацию и анализ больших объемов данных в различных разрезах.

Образовалось противоречие: с одной стороны, есть большие объемы информации, которые необходимо анализировать, а с другой стороны, эта информация не структурирована, разрозненна и ее очень сложно анализировать.

Для разрешения данного противоречия появились различные концепции получения исходных данных из транзакционных систем и сохранения их в предметно-ориентированных информационных базах данных, имеющих специально разработанные структуры данных, предназначенные для подготовки отчетов и бизнес-анализа: Data Warehouse, Data Mart, On-Line Analytical

Processing (OLAP), Relational On-Line Analytical Processing (ROLAP) и другие [62-64].

В частности, в 1991 году компанией Forrester Research была предложена концепция Витрин Данных (Data Mart), под которой понимается множество тематических баз данных, содержащих информацию, относящуюся к отдельным аспектам деятельности компании, и которые предоставляют пользователям и аналитикам возможности для быстрого анализа только реально интересующих их данных, а не огромного количества данных по всей компании. Различные витрины данных могут размещаться в различных сегментах компьютерной сети, обслуживая запросы определенных групп пользователей.

В том же 1991 году в Институте проблем управления РАН была предложена более интересная концепция структурно-технологического резервирования [65, 66].

Структурно-технологическое резервирование (СТР) является обобщением методов функционально – технологической избыточности и применяется в крупномасштабных информационно – справочных системах, основанных на использовании распределенных баз данных. Данная концепция объединяет в себе преимущества концепции использования реплик массивов данных, распределенных по узлам компьютерной сети (повышение надежности и производительности распределенной системы), и предметно-ориентированных информационных баз данных, упомянутых выше, которые хранят информацию, структурированную таким образом, чтобы облегчить и ускорить получение отчетов и бизнес-анализ хранящихся данных.

Суть данного вида резервирования заключается в том, что во многих случаях особенности решения группы задач пользователей и обработки множества их запросов к данным позволяют выделить некоторую инвариантную множеству запросов и задач пользователей часть технологии обработки данных. Эту часть технологии можно выполнить заранее, сформировав в результате некий промежуточный, вспомогательный, массив данных и использовать его при обработке запросов и решении задач пользователей.

При формировании структурно-технологического резерва предметная область пользо-

вателей РСОД считается заданной. Взаимодействие пользователей с системой представляется в виде множества процедур обработки данных. Каждый запрос пользователей относится к некоторому определенному типу и характеризуется своим набором выходных данных. Обработка каждого запроса характеризуется деревом исполнения, т.е. последовательностью выполнения процедур обработки данных.

Конечной целью технологии структурно-технологического резервирования является формирование промежуточных массивов данных, которые распределяются по узлам РСОД централизованным или децентрализованным образом в виде нескольких реплик.

Сформированные таким образом промежуточные массивы данных структурно-технологического резерва, размещенные в узлах компьютерной сети, обеспечивают кратчайший путь доступа пользователей к необходимой им информации. Использование СТР, таким образом, позволяет увеличить эффективность функционирования распределенной системы за счет значительного снижения времени решения задач пользователей и поступающих от них запросов.

Методология формирования структурно-технологического резерва в кратком изложении заключается в следующем [66].

Предполагаем, что предметная область пользователей РСОД определена и построен интегрированный граф G^* канонической структуры распределенной базы данных системы, в которой выделены групповые и простые информационные элементы.

Взаимодействие множества K пользователей с РБД представляется в виде множества V процедур обработки данных: $V = \{V_k\}$, $k = 1, \bar{K}$, где: $V_k = (Z_k \cup K_k)$.

При обработке запросов каждого пользователя u_k системы используется $V_k = \{V_n^k\}$, $n = 1, \bar{N}$, $k = 1, \bar{K}$ процедур обработки данных. Данные процедуры используются для обработки множества информационных запросов $Z_k = \{Z_z^k\}$, $k = 1, \bar{K}$, $z = 1, \bar{Z}$ и множества запросов на обновление информации (корректировки данных) $K_k = \{K_s^k\}$, $k = 1, \bar{K}$, $s = 1, \bar{S}$. Тогда множе-

ство: $Z = \bigcup_k Z_k = \{Z_k\}, k = 1, \bar{K}$ является полным множеством запросов пользователей системы.

Затем данное множество запросов анализируется на предмет общности (подобия) между запросами. Степень общности запросов пользователей определяется методом последовательного получения и анализа попарных пересечений их информационных множеств. В результате выявляется несколько подмножеств запросов, обладающих определенной степенью общности. Именно для этих подмножеств целесообразно формировать промежуточные массивы данных, которые затем должны быть наиболее эффективным образом распределены по сегментам компьютерной сети, на основе которой работает РСОД.

Задачи поиска оптимального размещения по узлам РСОД структурно-технологического резерва можно формулировать с использованием следующих критериев оптимальности решения: минимум времени обработки запросов пользователей, максимум вероятности обработки запросов и минимум стоимости функционирования системы, которая должна включать стоимость хранения и поддержания в актуальном состоянии структурно-технологический резерв. Для решения данных задач можно применять статические методы решения задач оптимального распределения фрагментов данных в сети, которые были упомянуты ранее в разделе 3. Например, можно использовать алгоритмы, описанные в работах [26, 38].

Структурно-технологическое резервирование имеет свои плюсы и минусы. Основные плюсы были перечислены выше. Теперь остановимся на некоторых недостатках или сложностях, которые возникают при проектировании и использовании данного вида резервирования.

Во-первых, при проектировании структурно-технологического резерва для использования в крупномасштабных РСОД с огромным количеством пользователей необходимо выполнить большую работу по анализу запросов пользователей: перечень запрашиваемой информации, частота или периодичность возникновения запросов, территориальная распределенность пользователей, выделение групп пользователей, запрашивающих аналогичные данные.

Во-вторых, на основе полученных аналитических данных необходимо спроектировать

структуру данных СТР, оптимальную с точки зрения времени обработки запросов и выполнения процедур обработки данных, формирующих промежуточные и/или итоговые данные.

В-третьих, для выделенных групп пользователей необходимо определить сегмент или сегменты вычислительной сети, в которых необходимо так разместить фрагменты СТР, предназначенные для обработки запросов этих групп пользователей, чтобы обеспечивалось оптимальное время обработки запросов.

В-пятых, необходимо решить проблему поддержки достоверности информации в СТР в случае изменения тех или иных исходных данных.

В-шестых, высококвалифицированным системным аналитикам и архитекторам необходимо тщательно спроектировать технологию формирования СТР в случае использования большого количества источников исходных данных, так как это будет очень ресурсоемкий процесс.

Заключение

В данном кратком обзоре отсутствуют сведения о технических и программных промышленных продуктах, предназначенных для хранения, копирования и восстановления информации в системах обработки данных разного масштаба. Данные о таких продуктах легко найти на просторах интернета, в специализированных журналах или в официальных документах компаний-производителей, присутствующих на рынке ИТ-технологий.

Ценность обзора заключается в том, что в нем, хоть и очень кратко в силу ограничений на объем работы, дано представление об основных формальных моделях и методах, которые целесообразно использовать при проектировании и эксплуатации различных систем обработки данных. Эти методы дают архитекторам и проектировщикам систем обработки данных инструменты, которые помогают им найти наиболее эффективный способ применения технических и программных средств, обеспечивающих сохранность и достоверность информации в таких сложных системах, какими являются крупномасштабные РСОД. Обзор также представляет интерес для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Литература

1. Казарин О.В. Безопасность программного обеспечения компьютерных систем. – М.: МГУИТ, 2003. – 212 с.
2. Восстановление данных. URL: <http://www.datarecovery.ru/> (дата обращения 12.11.2016).
3. Фролов А., Фролов Г. Сохранность и восстановление компьютерных данных: теория и практика // Byte Россия - 2001, - №1
4. Azzam Sleit и др. A Dynamic Object Fragmentation and Replication Algorithm In Distributed Database Systems// American Journal of Applied Sciences 4 (8): 613-618, 2007
5. Managing the costs of downtime. Continuous real-time data replication & clustering software: the next level of disaster recovery. Constant Data, Inc. August 2004. p.-8. URL: <http://costkiller.net/tribune/Tribu-PDF/Managing-the-Cost-of-Downtime.pdf> [дата обращения 2017-02-07]
6. "2001 Cost of Downtime Online Survey," by Contingency Planning Research, a division of Eagle Rock Alliance, West Orange, N.J. Aug. 2001 URL: <http://www.eaglerockltd.com/> (дата обращения 2017-04-10).
7. Acronis Global Disaster recovery Index. <http://www.acronis.com/ru-URL: ru/pr/2012/05/11-10-52.html> (дата обращения: 2016-11-03)
8. Data loss, poor recovery looms large. IT-Online on Mar 2, 2015, URL: <http://it-online.co.za/2015/03/02/data-loss-poor-recovery-looms-large/> (дата обращения: 2016-11-08).
9. Кульба В.В., Цвиркун А.Д. Некоторые задачи оптимального резервирования информационных массивов. Автоматика и телемеханика. 1971, №6, с. 92-98.
10. Turksen, I.B. and Kulba V.V. File Redundancy in Information Systems. Working Paper #76-015, Department of Industrial Engineering, University of Toronto. 1976.
11. Turksen, I.B. and Kulba V.V. Strategies of File Redundancy in Information Systems. Working Paper #78-013, Department of Industrial Engineering, University of Toronto. 1978.
12. Кульба В.В. Анализ стратегий резервирования информационных массивов в АСУ. -Сб. трудов. Вып. 14. Методы и модели планирования и управления в дискретных производственных системах. М., Института проблем управления, 1977. с. 20-32.
13. Eswaran K. P. Placement of records in a file and file allocation in a computer. // IFIP Congress. 1974. P. 304–307.
14. Morgan H. L., Levin K. D. Optimal program and data locations in computer networks // Commun. ACM. 1977. Vol. 20, no. 5. P. 315–322.
15. Кульба В.В., Сомов С.К., Шелков А.Б. Резервирование данных в сетях ЭВМ. Казань, Издательство казанского университета, 1987, - 175 с.
16. Ma, Moses ; Athans, Michael. Optimal File Allocation Problems for Distributed Data Bases in Unreliable Computer Networks// Massachusetts Inst of Tech Cambridge Lab for Information and Decision Systems. 1982,- 7 p.
17. Suri R. A decentralized approach to optimal file allocation in computer networks // Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1979 18th IEEE Conference on. Vol. 18. 1979. dec. P. 141–146.
18. Mahmoud S.A., Riordon J.S. Optimal Allocation of Resources in Distributed Information networks. - ACM Transactions on Database Systems, 1976, Vol.1, N.4, p. 66-78.
19. Fisher M.L., Hochbaum D.S. Database location in computer networks. - Journ. ACM, 1980, Vol. 27, N. 4, p. 718- 735.
20. Coffman E.G., Gelenbe E., Plateau B. Optimization of the number of copies in a distributed data base. – IEEE Transactions of Software Eng., 1981, Vol. 7, N. 1, p. 78-84.
21. Микрин Е.А., Сомов С.К. Оптимальное оперативное резервирование информации в системах обработки данных на базе вычислительных сетей // Проблемы управления – 2016. - №5. С. 47-56.
22. Микрин Е.А., Сомов С.К. Оптимизация резервирования информации в распределенных системах обработки данных реального времени // Проблемы управления – 2016. - №6. С. 47-52
23. Abdalla H. I. A synchronized design technique for efficient data distribution // Computers in Human Behavior. - 2014, vol. 30, pp. 427–435.
24. Mansouri N. Adaptive data replication strategy in cloud computing for performance improvement // Frontiers of Computer Science (print). - 2016, 10(5), p. 925–935
25. Sahoo J., Salahuddin M.A., Glioth R. A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks. – 2016. IEEE Communications Surveys & Tutorials, p. 30.– URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.01729.pdf> (дата обращения: 2016-11-08).
26. Singh A., Kahlon K. S. Non-replicated dynamic data allocation in distributed database system // International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 9, no. 9, 2009.
27. Кульба В.В., Шелков А.Б., Пелихов В.П. Стратегии резервирования информационных массивов. // Сб. трудов. Построение автоматизированных систем обработки данных. Вып. 16. / Ин-т пробл. упр. - М., - 1978. - С. 26-42.
28. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т.1: - М.: Мир, 1984.-528 с.
29. Коннолли Т., Бег К. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика. 3-е издание. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. — 1440 с.
30. Распределенные системы. Принципы и парадигмы /Э. Таненбаум, М. ван Стеен. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.: ил. – (Серия «Классика computer science»).
31. Алешин И. Удаленная репликация данных для защиты информационных ресурсов // IKS-online. – 2006. – № 5. URL: <http://www.iksmedia.ru/articles/27831-Udalennaya-replikaciya-dannyx-dlya.html#ixzz4Qq71Qd00> (дата обращения 2017-04-24)
32. Апанасевич Д.А. Математическое и программное обеспечение асинхронной репликации данных реляционных СУБД методом выделения объектов: автореферат дис.канд.техн.наук. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 20 с.
33. Alireza Souri, Amir masoud Rahmani. A Survey for Replica Placement Techniques in Data Grid Environment// I.J. Modern Education and Computer Science - 2014, №5, 46-51.
34. Белоусов В.Е. Алгоритмы репликации данных в распределенных системах обработки информации: автореферат дис.канд.техн.наук. –Пенза: ПГУ, 2005. – 28 с.
35. Лебедев А. Удаленная репликация: критерии выбора//Storage News - 2006, - №2, с. 6-9.
36. Чернышев Г.А. Обзор подходов к организации физического уровня в СУБД// Труды СПИИРАН. - Санкт-Петербург, 2013. Вып. 1(24). - с. 222 – 275.

37. Ozsu M. T., Valduriez P. Principles of distributed database systems (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice-Hall, Inc., 1999.- с. 845.
38. Singh. A., Kahlon S.K., Virk R.S. Nonreplicated Static Data Allocation in Distributed Databases Using Biogeography-Based Optimization// Chinese Journal of Engineering, 2014. p. 1-9.
39. Sahoo J., Salahuddin M.A., Glitho R. A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. p. 30.
40. Alireza Souri, Amir masoud Rahmani. A Survey for Replica Placement Techniques in Data Grid Environment. IJ. Modern Education and Computer Science. V.5. 2014. p.46-51.
41. Foster I., Kesselman C., Tuecke S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. International J. Supercomputer Applications, 15(3), 2001. URL: <http://www.globus.org/alliance/publications/papers/anatomy.pdf> (дата обращения 2017-04-25).
42. I. Foster, C. Kesselman,. The Grid 2: Blueprint for a New Computing Infrastructure, 2 Edition. 2004, Morgan Kaufmann Publishers, p.748.
43. Rahman R. M., Barker K., Alhadj R. Replica Placement Strategies in Data Grid// J Grid Computing, 2008, pp.103-123.
44. Fisher M.L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems//Management Science, 1981, v27, pp 1-18.
45. Сомов С.К. Оптимизация вычислительных и информационных задач в GRID сетях / Сборник докладов Международной научной конференции «Проблема Регионального и муниципального управления». – М.: РГТУ, 2009. с. 192–196.
46. Сомов С.К. Резервирование программных модулей и информационных массивов в сетях ЭВМ: диссертация кандидата технических наук. – М., ИПУ РАН, 1983. – 217 с.
47. Machmoud S., Riordon J.S. Optimal Allocation of Resources in Distributed Information networks. - ACM Transactions on Database Systems, 1976, Vol.1, N.4, p. 66-78.
48. Chu W.W, File Allocation in a Multiple Computer System. IEEE Transactions on Computers, 1969, Vol. C-18, N. 10, p. 885-889.
49. Casey R.G. Allocations of copies of a file in an Information Network. //AFIPS Conference Proceedings, - 1972, Vol. 40. - P. 617-625.
50. Гурин Л.С., Дымарский Я.С., Меркулов А.Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. - М.: Сов.радио, 1968, - 463 с.
51. Берзин Е.А., Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. - М.: Сов. радио, 1974. - 304 с.
52. TADVISER. Резервное копирование и хранение данных. URL: http://www.tadviser.ru/index.php/ИБ_Резервное_копирование_и_хранение_данных (дата обращения: 2017-06-29).
53. А. Гончаров. Методы защиты данных: обзор решений. - Storage News, 2006, № 2 (27), p. 28-31.
54. С. Верчёнов. КРОК: резервное копирование на практике. -Storage News. 2013, № 2 (54), p. 12-15.
55. Шелков А.Б., Сомов С.К., Коробко В.Б. Восстановительное резервирование программных модулей и информационных массивов в сетях ЭВМ // Анализ и синтез оптимальных модульных СОД: Сб. тр. Института проблем управления. - М.: ИПУ, 1984.
56. Просвирнин В.Н., Кошелев В.А., Сомов С.К. Автоматизация сопровождения архива магнитных носителей. – В кн.: «Автоматизация проектирования и конструирования». II Всесоюзное совещание. Тезисы докладов. - М.: Институт проблем управления, 1983, с. 110-111.
57. Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Наткович Б.Ю., Шелков А.Б. Восстановление информации в системах обработки данных. Препр. / ИПУ. – М., 1988
58. Микрин Е.А., Шелков А.Б., Павельев В.В. Методы восстановления данных в распределенных автоматизированных системах / Научное издание – М.: ИПУ РАН, 2009. - 68 с.
59. Кульба В.В., Сомов С.К. Повышение надежности функционирования распределенных СОД методами резервирования и восстановления информации. Информатизация и связь №3, 2016, с.86-94
60. Микрин, С.К. Сомов. Анализ эффективности стратегий восстановления информации в распределенных системах обработки данных // Информационные технологии и вычислительные системы – 2016. - №3. С.5-19.
61. Шелков А.Б. Восстановительное резервирование информационных массивов в АСУ. //Сб. трудов. Вып. 25. - М.: Институт проблем управления, 1981, - с. 112-123.
62. Щавелёв Л.В. Оперативная аналитическая обработка данных: концепции и технологии. URL: http://www.olap.ru/basic/olap_and_ida.asp (дата обращения 2017-07-06).
63. Туманов В. Data Warehouse: с чего начать?//PC Week, (153)29' 1998. URL: <https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=48156> (дата обращения 2017-07-06).
64. Standen J. Data Warehouse vs Data Mart. URL: <http://www.datamartist.com/data-warehouse-vs-data-mart>. (дата обращения 2017-07-06).
65. Карсанидзе Т.В. Структурно – технологическое резервирование данных в системах, функционирующих на базе ЛВС. – В кн. 4-е Всесоюзное совещание по распределенным вычислительным системам массового обслуживания. Тезисы докладов. М., ИПУ, 1991.
66. Карсанидзе Т.В. Резервирование, восстановление и регистрация информации в автоматизированных системах управления, функционирующих на базе локальных сетей ЭВМ: автореферат дисс. канд. техн. наук.- Москва, ИПУ РАН, 1992, 23 с.
67. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. - М.: Мир, 1981. - 323 с.

Микрин Евгений Анатольевич. Генеральный конструктор ПАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королёва". Окончил МВТУ имени Н.Э. Баумана в 1979 году, МИЭМ в 1984 году. Доктор технических наук, академик РАН, профессор. Количество печатных работ: более 250, в том числе 8 монографий. Область научных интересов: теория автоматического управления, механика. E-mail: Eugeny.Mikrin@rsce.ru

Сомов Сергей Константинович. Старший научный сотрудник ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова РАН. Окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского в 1977 году. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: более 30, в том числе 2 монографии. Область научных интересов: распределенные системы, сохранность информации, резервирование и репликация данных. E-mail: ssomov2016@ipu.ru

Overview of models and methods to ensure information integrity in a distributed data processing systems

E.A. Mikrin, S.R. Somov

This article provides a brief overview of the formal models and methods used to ensure the safety of information in data processing systems of different scale and purpose. The main attention is paid to methods of ensuring the safety of information in distributed systems operating on the basis of computer networks. The main reasons for occurrence of incidents with data are listed and their influence on business of the companies is described. Considered the data replication method that provides not only the security of data in distributed systems, but also good performance of these systems. An example of replicas placement optimization in GRID-networks is given. Considered the use of formal models and methods of information recovery enhancing data integrity in the system. Also, the concept of using the structural and technological reserve for improving the performance of distributed systems is considered.

Keywords: data integrity, distributed systems, replication, information recovery, structural and technological reserve.

References

1. Kazarin O.V. Bezopasnost' programmnoho obespechenija komp'yuternyh sistem [Security of computer systems software]. – Moscow. : MGUL, 2003. – 212 p.
2. Vosstanovlenie dannyh [Data recovery]. Available at: <http://www.datarecovery.ru/>» (accessed November 12, 2016).
3. Frolov A., Frolov G. Sohrannost' i vosstanovlenie komp'yuternyh dannyh: teoriya i praktika [Computer data safety and recovery: theory and practice] // Byte Russia - 2001, - vol.1
4. Azzam Sleit и др. A Dynamic Object Fragmentation and Replication Algorithm In Distributed Database Systems//American Journal of Applied Sciences 4 (8): 613-618, 2007
5. Managing the costs of downtime. Continuous real-time data replication & clustering software: the next level of disaster recovery. Constant Data, Inc. August 2004. p.-8. Available at: <http://costkiller.net/tribune/Tribu-PDF/Managing-the-Cost-of-Downtime.pdf> (Accessed February 07, 2017).
6. "2001 Cost of Downtime Online Survey," by Contingency Planning Research, a division of Eagle Rock Alliance, West Orange, N.J. Aug. 2001. Available at: <http://www.eaglerockltd.com/> (Accessed April 10, 2017).
7. Acronis Global Disaster recovery Index. Available at: <http://www.acronis.com/ru-ru/pr/> (Accessed November 03, 2016).
8. Data loss, poor recovery looms large. IT-Online on Mar 2, 2015. Available at: <http://it-online.co.za/2015/03/02/data-loss-poor-recovery-looms-large/> (Accessed November 08, 2016).
9. Kulba V.V., Tsvirkun A.D. Nekotorye zadachi optimal'nogo rezervirovaniya informacionnyh massivov [Certain problems of optimal reservation of information files]. Automation and Remote Control. 1971, vol.6, p. 92-98.
10. Turksen, I.B., Kulba V.V. File Redundancy in Information Systems. Working Paper #76-015, Department of Industrial Engineering, University of Toronto. 1976.
11. Turksen, I.B., Kulba V.V. Strategies of File Redundancy in Information Systems. Working Paper #78-013, Department of Industrial Engineering, University of Toronto. 1978.
12. Kulba V.V. Analiz strategij rezervirovaniya informacionnyh massivov v ASU [Analysis of strategies for reserving information arrays in the automated control system]. - Sb. trudov. Vyp. 14. Metody i modeli planirovaniya i upravleniya v diskretnykh proizvodstvennykh sistemah. [Proceedings Iss. 14. Methods and models of planning and control in discrete production systems]. Moscow, Institute of Control Sciences, 1977, p. 20-32.
13. Eswaran K. P. Placement of records in a file and file allocation in a computer. // IFIP Congress. 1974. P. 304–307.
14. Morgan H. L., Levin K. D. Optimal program and data locations in computer networks // Commun. ACM. 1977. Vol. 20, no. 5. P. 315–322.
15. Kulba V.V., Somov S.K., Shelkov A.B. Rezervirovanie dannyh v setjah JeVM. Kazan' . [Data reservation in computer networks]. Kazan, Kazan University Publishing House, 1987, - 175 p.
16. Ma Moses, Athans Michael. Optimal File Allocation Problems for Distributed Data Bases in Unreliable Computer Networks// Massachusetts Inst. of Tech Cambridge Lab for Information and Decision Systems. 1982,- 7 p.
17. Suri R. A decentralized approach to optimal file allocation in computer networks // Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1979 18th IEEE Conference on. Vol. 18. 1979. dec. P. 141–146.

18. Mahmoud S.A., Riordon J.S. Optimal Allocation of Resources in Distributed Information networks. //ACM Transactions on Database Systems, 1976, Vol.I, N.4, p. 66-78.
19. Fisher M.L., Hochbaum D.S. Database location in computer networks. - Journ. ACM, 1980, Vol. 27, N. 4, p. 718- 735.
20. Coffman E.G., Gelenbe E., Plateau B. Optimization of the number of copies in a distributed data base. – IEEE Transactions of Software Eng., 1981, Vol. 7, N. 1, p. 78-84.
21. Mikrin E.A., Somov S.K. Optimal'noe operativnoe rezervirovanie informacii v sistemah obrabotki dannyh na baze vychislitel'nyh setej [The optimal online information backup in the data processing systems based on computer networks redundancy] // Control Sciences – 2016. - vol.5. pp. 47-56.
22. Mikrin E.A., Somov S.K. Optimizacija rezervirovanija informacii v raspredeennyh sistemah obrabotki dannyh real'nogo vremeni [Information reservation optimization in real-time distributed data processing systems] //Control Sciences – 2016. – vol.6. pp. 47-52.
23. Abdalla H. I. A synchronized design technique for efficient data distribution // Computers in Human Behavior. - 2014, vol. 30, pp. 427–435.
24. Mansouri N. Adaptive data replication strategy in cloud computing for performance improvement // Frontiers of Computer Science (print). - 2016, 10(5), p. 925–935
25. Sahoo J., Salahuddin M.A., Glitho R. A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks. – 2016. IEEE Communications Surveys & Tutorials, p. 30. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.01729.pdf>. (Accessed July 28, 2017).
26. Singh A., Kahlon K. S. Non-replicated dynamic data allocation in distributed database system // International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 9, no. 9, 2009.
27. Kulba V.V., Shelkov A.B. Pelihov V.P. Strategii rezervirovanija informacionnyh massivov [Strategies for reserving information arrays] // Proceedings. Postroenie avtomatizirovannyh sistem obrabotki dannyh [Construction of automated data processing systems] Issue. 16. / Institute of Control Sciences. - Moscow., - 1978. - pp. 26-42.
28. Feller V. Vvedenie v teoriju verojatnostej i ee prilozhenija. [An introduction to probability theory and its applications]. Vol.1 –Moscow, Publishing house Mir, 1984.-528 p.
29. Connolly T., Begg C. Bazy dannyh. Proektirovanie, realizacija i soprovozhdenie. Teorija i praktika. 3-e izdanie [Data Base Systems. A Practical Approach to Design, Implementation, and Management. 3 Edition]. - Moscow: Publishing house "William". -2003. — 1440 p.:
30. Raspedelennye Sistemy. Principy i paradigmy [Distributed Systems. Principles and paradigms]. /A. Tanenbaum, M. Steen. – Moscow, 2003. – 877 p.
31. Aleshin I. Udalennaja replikacija dannyh dlja zashhity informacionnyh resurso [Remote replication of data to protect information resources] // IKS-online. – 2006. – vol. 5. Available at: <http://www.iksmedia.ru/articles/27831-Udalennaya-replikacija-dannyx-dlya.html#ixzz4Qq71Qd00> (Accessed June 24, 2017)
32. Apanasevich D.A. 2008. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie asinhronnoj replikacii dannyh reljacionnyh SUBD metodom vydelenija ob#ektov [Mathematical and software of asynchronous data replication of relational DBMS by means of object selection]. PhD Thesis. – Voronezh: VGTU. 20 p.
33. Alireza Sourì, Amir masoud Rahmani. A Survey for Replica Placement Techniques in Data Grid Environment// I.J. Modern Education and Computer Science - 2014, vol.5, 46-51
34. Belousov V.E. 2005. Algoritmy replikacii dannyh v raspredeennyh sistemah obrabotki informacii [Algorithms of data replication in distributed information processing systems]. PhD Thesis. –Penza: PGU, 2005. 28 p.
35. Lebedev A. Udalennaja replikacija: kriterii vybora [Remote Replication: Selection Criteria] //Storage News - 2006, - vol.2, pp. 6-9.
36. Chernyshev G.A. Obzor podhodov k organizacii fizicheskogo urovnja v SUBD [Overview of approaches to the organization of the physical layer in the DBMS] // Proceedings of SPIIRAS. - St. Petersburg, 2013. Iss. 1(24). - pp. 222 – 275.
37. Ozsu M. T., Valduriez P. Principles of distributed database systems (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice-Hall, Inc., 1999.- C. 845.
38. Singh. A., Kahlon S.K., Virk R.S. Nonreplicated Static Data Allocation in Distributed Databases Using Biogeography-Based Optimization// Chinese Journal of Engineering, 2014. p. 1-9.
39. Sahoo J., Salahuddin M.A., Glitho R. A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. p. 30.
40. Alireza Sourì, Amir masoud Rahmani. A Survey for Replica Placement Techniques in Data Grid Environment. I.J. Modern Education and Computer Science. V.5. 2014. p.46-51.
41. Foster I., Kesselman C., Tuecke S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. International J. Supercomputer Applications, 15(3), 2001. Available at: <http://www.globus.org/alliance/publications/papers/anatomy.pdf> (Accessed April 25, 2017).
42. I. Foster, C. Kesselman, The Grid 2: Blueprint for a New Computing Infrastructure, 2 Edition. 2004, Morgan Kaufmann Publishers, p.748.
43. Rahman R. M., Barker K., Alhadj R. Replica Placement Strategies in Data Grid// J Grid Computing, 2008, pp.103-123.
44. Fisher M.L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems//Management Science, 1981, v27, pp 1-18.
45. Somov S.K. Optimizacija vychislitel'nyh i informacionnyh zadach v GRID setjah [Optimization of computing and information problems in the GRID networks] / Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Problema Regional'nogo i municipal'nogo upravlenija» [Collection of reports of the International Scientific Conference "The Problem of Regional and Municipal Management"]. – Moscow.: RGGU, 2009.pp. 192–196.

46. Somov S.K. 1983. Rezervirovanie programmyh modulej i informacionnyh massivov v setjah JeVM [Reservation program modules and data arrays in computer networks]: PhD Diss. Moscow, ICS RAS. 217 p.
47. Machmoud S., Riordon J.S. Optimal Allocation of Resources in Distributed Information networks. - ACM Transactions on Database Systems, 1976, Vol.1, N.4, p. 66-78.
48. Chu W.W, File Allocation in a Multiple Computer System. IEEE Transactions on Computers, 1969, Vol. C-18, N. 10, p. 885-889.
49. Casey R.G. Allocations of copies of a file in an Information Network. //AFIPS Conference Proceedings, - 1972, Vol. 40. - P. 617-625.
50. Gurin L.S., Dymarskij Ja.S., Merkulov A.D. Zadachi i metody optimal'nogo raspredelenija resursov [Tasks and methods for optimal allocation of resources]. - Moscow: Sov.radio, 1968, - 463 p.
51. Berzin E.A., Optimal'noe raspredelenie resursov i jelementy sinteza system [Optimal resource allocation and elements of system synthesis.]. - Moscow: Sov.radio., 1974. - 304 p.
52. TADVISER. Rezervnoe kopirovanie i hranenie dannyh [Backup and storage of data]. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php> (Accessed Jun 29, 2017).
53. A. Goncharov. Metody zashhity dannyh: obzor reshenij [Data protection methods: review of solutions]. - Storage News, 2006, vol. 2 (27), p. 28-31.
54. S. Verchjonov. KROK: rezervnoe kopirovanie na praktike [CROC: backup in practice]. -Storage News. 2013, vol. 2 (54), p. 12-15.
55. Shelkov A.B., Somov S.K., Korobko V.B. Vosstanovitel'noe rezervirovanie programmyh modulej i informacionnyh massivov v setjah JeVM [Redundant redundancy of software modules and information arrays in computer networks] // Analiz i sintez optimal'nyh modul'nyh SOD [Analysis and synthesis of optimal modular SOD]: Proceedings of the Institute of Control Sciences. - Moscow: ICS, 1984.
56. Prosvirnin V.N., Koshelev V.A., Somov S.K. Avtomatizacija soprovozhdenija arhiva magnitnyh nositelej [Automation support archive of magnetic media.]. – In the book, "Computer-aided design and engineering." Second All-Union Conference. Abstract. – Moscow, Institute of Control Sciences, 1983, pp. 110-111.
57. Mamikonov A.G., Kulba V.V., Natkovich B.U., Shelkov A.B. Vosstanovlenie informacii v sistemah obrabotki dannyh [Information recovery in data processing systems]. Prepr. – Moscow, ICS RAS, 1988.
58. Mikrin E.A., Shelkov A.B., Pavel'ev V.V. Metody vosstanovlenija dannyh v raspredelennyh avtomatizirovannyh sistemah [Methods of data recovery in distributed automated systems] / Scientific publication – M.: Moscow, ICS RAS, 2009. - 68 p.
59. Kulba V.V., Somov S.K. Povyshenie nadezhnosti funkcionirovanija raspredelennyh SOD metodami rezervirovanija i vosstanovlenija informacii [Increase of reliability of functioning of distributed SOD by methods of reservation and recovery of information]. Informatizacija i svjaz' [Information and communication] vol.3, 2016, pp.86-94.
60. Mikrin E.A., Somov S.K. Analiz jeffektivnosti strategij vosstanovlenija informacii v raspredelennyh sistemah obrabotki dannyh [Analysis of the effectiveness of information recovery strategies in distributed data processing systems] - Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy [Information technology and computer systems] – 2016. - vol.3. pp.5-19
61. Shelkov A.B. Vosstanovitel'noe rezervirovanie informacionnyh massivov v ASU [Restorative backup of information arrays in the automated control system]. // Collection of works of the ICS RAS, Issue 25. – Moscow.: ICS RAS, 1981, - pp. 112-123.
62. Shhaveljov L.V. Operativnaja analiticheskaja obrabotka dannyh: koncepcii i tehnologii [Operative analytical data processing: concepts and technologies]. Available at: http://www.olap.ru/basic/olap_and_ida.asp (Accessed July 06, 2017).
63. Tumanov V. Data Warehouse: s chego nachat'? [Data Warehouse: where to start] //PC Week, (153)29' 1998. Available at: <https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=48156> (Accessed July 06, 2017-07-06).
64. Standen J. Data Warehouse vs Data Mart. Available at: <http://www.datamartist.com/data-warehouse-vs-data-mart>. (Accessed July 06, 2017).
65. Karsanidze T.V. Strukturno – tehnologicheskoe rezervirovanie dannyh v sistemah, funkcionirujushhij na baze LVS [structural and technological redundancy of data in systems operating on the basis of LAN]. – In the book. The 4th All-Union Meeting on Distributed Computing Queuing Systems. Theses of reports. – Moscow, ICS RAS, 1991.
66. Karsanidze T.V. 1992 - Rezervirovanie, vosstanovlenie i registracija informacii v avtomatizirovannyh sistemah upravlenija, funkcionirujushhij na baze lokal'nyh setej JeVM [Reservation, restoration and registration of information in automated control systems operating on the basis of local computer networks]: PhD Diss. Moscow, ICS RAS, 23 p.
67. Mainica E. Optimization algorithms on networks and graphs. - Moscow: Mir, 1981. - 323 p.

Mikrin Yevgeniy Anatolievich. Principal designer, PAO "S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia", 4a Lenina str., Korolev, Russia. Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science, Engineering, professor. Graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1979, from MIEM in 1984. Author of more than 250 publications, including 8 monographs. Area of expertise: automatic control theory, mechanics. E-mail: Eugeny.Mikrin@rsce.ru

Somov Sergej Konstantinovich. Senior researcher, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya str. Candidate of Science, Engineering. Graduated from Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky in 1977. Author of more than 30 publications, including 2 monographs. Area of expertise: distributed system, information integrity, data replication and reservation. E-mail: ssomov2016@ipu.ru