

## АНАЛИЗ ДВУХУРОВНЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С РЕПЛИКАЦИЕЙ ДАННЫХ

Мейкшан Л.И.

Рассматривается распределенная информационная система (ИС), состоящая из центральной базы данных (ЦБД) и совокупности локальных баз данных (ЛБД) для удаленных пользователей. С помощью асинхронной репликации в каждой ЛБД поддерживается копия некоторой части ЦБД. Для анализируемой ИС представлена математическая модель и с использованием этой модели показано, что при определенных условиях наличие локальных данных уменьшает среднее время обработки запроса, а также снижает затраты на передачу данных между отдельными элементами системы.

### Введение

Появление технологии баз данных первоначально привело к централизованной поддержке и обработке больших объемов данных. Однако в дальнейшем под влиянием быстрого развития инфокоммуникационных технологий (мощные персональные компьютеры, цифровые сети связи, Internet) значительно усилились противоположные факторы децентрализации процессов хранения и обработки данных [1]. Одним из самых существенных достижений в этой области считается создание программных средств для управления распределенными базами данных.

Все дело в том, что децентрализованный подход в большей степени соответствует организационной структуре многих крупных корпораций, состоящих из отдельных функциональных подразделений и филиалов, которые географически распределены в пределах обширной территории. При этом каждая достаточно самостоятельная организационная единица всегда имеет дело с собственным набором данных, необходимых для управления соответствующими бизнес-процессами.

Не вызывает сомнений, что распределенные БД, способные обеспечивать требуемый уровень доступности данных, производительности и надежности, являются гораздо более сложными аппаратно-программными комплексами по сравнению с сосредоточенными системами. В частности, дополнительные предпосылки для усложнения создаются при использовании технологии тиражирования (репликации) данных [2-4]. Если соответствующие механизмы функционируют недостаточно эффективно, то преимущества рас-

пределенной архитектуры превращаются в ее недостатки.

### Описание исследуемой системы

В рассматриваемой информационной системе (ИС) центральный узел содержит основной (эталонный) экземпляр базы данных и получает все ее обновления (соответствующие запросы образуют пуассоновский поток со средней интенсивностью  $\lambda_q$ ). Кроме того, на каждой рабочей станции имеется локальная БД, где хранится некоторая доля ( $h \in [0; 1]$ ) центральной БД. Следовательно, с вероятностью  $h$  поступающий запрос на обновление относится к тиражируемым данным, поэтому обработка такого запроса сопровождается рассылкой корректирующих сообщений в соответствующие ЛБД. Такая структура распределенной ИС может использоваться при наличии центрального офиса компании и нескольких территориально удаленных филиалов.

Применение псевдокопий, когда при заданных требованиях к когерентности данных допускаются определенные несоответствия между оригиналом объекта в ЦБД и его образом в ЛБД, позволяет снизить фактическое число отправляемых сообщений. Разные уровни когерентности для тиражируемых данных будем характеризовать коэффициентом  $q \in [0; 1]$ , причем  $q = 1$  означает полное совпадение между оригиналами объектов и их копиями в локальных БД. Тогда вероятность того, что обработка поступившего запроса на обновление потребует рассылки сообщений с новыми данными, равна  $hq$ .

Каждая из  $n$  рабочих станций принимает от своих пользователей поисковые запросы, поступающие со средней интенсивностью  $\lambda_q$ . Предполагается, что для отдельно взятой рабочей станции информационные потребности пользователей имеют четко выраженную направленность, учитываемую при формировании соответствующей ЛБД. Чтобы количественно выразить более высокую вероятность обращения к локальным данным, вводится дополнительный параметр  $f \in [1; 1/h]$ . С учетом указанного параметра вероятность локальной обработки поискового запроса равна  $hf$ , а отправка этого запроса для обработки в ЦБД происходит с вероятностью  $1 - hf$ .

### Математическая модель

Отдельные элементы рассматриваемой ИС (центральный узел и периферийные рабочие станции) моделируются с помощью однолинейных СМО типа  $\overline{M}/\overline{G}/1/FCFS$ . При этом процессы обслуживания заявок разного вида характеризуются следующими величинами:

- среднее время обработки поискового запроса  $\tau_q$  (в центральной БД) и  $\tau'_q$  (в локальной БД);
- среднее время обработки запроса на обновление  $\tau'_u$  (в центральной БД) и  $\tau_u$  (в локальной БД);
- среднее время, требуемое серверу центральной БД на отправку одного сообщения для обновления локальной БД  $\tau_b$ .

Время доставки сообщения, передаваемого между центральной БД и рабочей станцией, рассматривается как постоянная величина ( $\tau_r$ ). Задержки в предоставлении доступа к каналу связи не учитываются. При этом предположении «узким местом» для исследуемой распределенной системы могут быть серверы баз данных, но не телекоммуникационное оборудование.

Среднее время, в течение которого пользователь ожидает ответа системы на свой запрос, будем определять с помощью соотношения

$$R = hf[W_w + \tau'_q] + (1 - hf)[2\tau_r + W_c + \tau_q], \quad (1)$$

где  $W_c$  и  $W_w$  – средние значения времени пребывания запроса в очереди на обработку для центрального узла и рабочей станции, соответственно. Первое слагаемое в этом выражении соответствует случаю, когда с вероятностью  $hf$  запрос полностью обслуживается в локальной БД, а второе слагаемое относится к обработке запроса в центральной БД (вероятность такой ситуации равна  $1 - hf$ ).

На рабочей станции имеется два вида заявок:

- поисковые запросы от пользователей – поступают с интенсивностью  $\lambda'_1 = hf \lambda_q$  и каждый из них требует для своего обслуживания среднего времени  $\Theta'_1 = \tau'_q$ ;
- запросы на обновление данных в локальной БД – возникают с интенсивностью  $\lambda'_2 = hq \lambda_u$  и отдельная транзакция выполняется за среднее время  $\Theta'_2 = \tau'_u$ .

Для математического ожидания и второго момента случайного времени обслуживания ( $X$ ) заявки можно записать:

$$E[X] = (\lambda'_1 / \lambda) \Theta'_1 + (\lambda'_2 / \lambda) \Theta'_2;$$

$$E[X^2] = 2[(\lambda'_1 / \lambda)(\Theta'_1)^2 + (\lambda'_2 / \lambda)(\Theta'_2)^2],$$

где  $\lambda = \lambda'_1 + \lambda'_2$ . Тогда с помощью формулы Поллячека-Хинчина получаем:

$$W_w = \frac{\lambda E[X^2]}{2(1 - \lambda E[X])} = \frac{A'_1 \Theta'_1 + A'_2 \Theta'_2}{1 - (A'_1 + A'_2)},$$

где  $A'_1 = \lambda'_1 \Theta'_1 = hf \lambda_q \tau'_q$ ;  $A'_2 = \lambda'_2 \Theta'_2 = hq \lambda_u \tau'_u$ .

Центральный узел характеризуется наличием трех категорий заявок: запросы на обновление данных – интенсивность поступления  $\lambda_1 = \lambda_u$  и среднее время выполнения запроса  $\Theta_1 = \tau_u$ ; требования на отправку корректирующих сообщений для обновления копий в локальных БД – возникают с интенсивностью  $\lambda_2 = hq \lambda_u$  и в каждом случае процедура рассылки осуществляется за среднее время  $\Theta_2 = n\tau_b$ ; поисковые запросы от рабочих станций – поступают с интенсивностью  $\lambda_3 = n(1 - hf) \lambda_q$  и процесс обработки отдельного запроса имеет среднюю длительность  $\Theta_3 = \tau_q$ . При этих условиях применение формулы Поллячека-Хинчина дает следующий результат:

$$W_c = \frac{A_1 \Theta_1 + A_2 \Theta_2 + A_3 \Theta_3}{1 - (A_1 + A_2 + A_3)},$$

где  $A_1 = \lambda_1 \Theta_1 = \lambda_u \tau_u$ ;  $A_2 = \lambda_2 \Theta_2 = nhq \lambda_u \tau_b$ ;  $A_3 = \lambda_3 \Theta_3 = n(1 - hf) \lambda_q \tau_q$ .

Введем следующие дополнительные обозначения:  $A_u = \lambda_u \tau_u$  – загрузка сервера центральной БД обработкой запросов на обновление;  $A_q = \lambda_q \tau_q$  – загрузка сервера центральной БД поисковыми запросами от одной рабочей станции (если бы все из них полностью обрабатывались этим сервером); коэффициент  $\beta = \tau'_q / \tau_q = \tau'_u / \tau_u$  – характеризует соотношение между быстродействием локальной БД и центральной БД; коэффициент  $\gamma = \tau_u / \tau_q = \tau'_u / \tau'_q$  – определяет соотношение между затратами времени на обработку поискового запроса и запроса на обновление;  $\omega = \tau_b / \tau_q$ ;  $g = \tau_r / \tau_q$ . С учетом этих обозначений получим:  $A'_1 = hf \beta A_q$ ;  $A'_2 = hq \beta A_u$ ;  $A_1 = A_u$ ;  $A_2 = nhq \omega A_u / \gamma$ ;  $A_3 = n(1 - hf) A_q$ .

В дальнейшем при оценке времени реакции исследуемой распределенной системы выберем в качестве условной единицы времени (у.е.в.) величину  $\tau_q$ . Тогда формула (1) преобразуется к следующему виду:

$$R^* = \frac{R}{\tau_q} = hf[W_w^* + \beta] + (1 - hf)[2g + W_c^* + 1], \quad (2)$$

где  $W_w^* = \frac{W_w}{\tau_q} = \frac{\beta(A'_1 + \gamma A'_2)}{1 - (A'_1 + A'_2)}$ ,

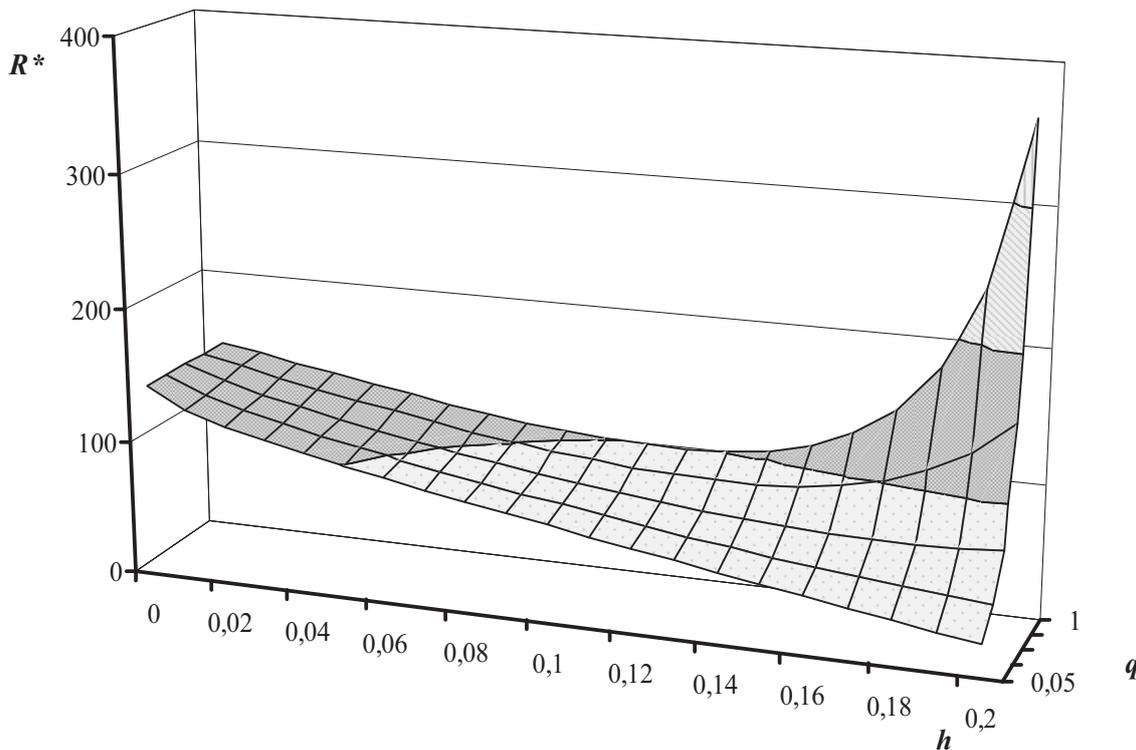


Рис. 1.

$$W_c^* = \frac{W_c}{\tau_q} = \frac{\gamma A_1 + n\omega A_2 + A_3}{1 - (A_1 + A_2 + A_3)}.$$

Среднее количество сообщений, передаваемых за единицу времени между центральным узлом и периферийными станциями, равно

$$M = 2n(1 - fh)\lambda_q + nhq\lambda_u.$$

Здесь первое слагаемое относится к поисковым запросам, для которых необходимые данные отсутствуют на рабочих станциях, а второе слагаемое обусловлено сообщениями, с помощью которых происходит обновление данных в локальных БД.

Если перейти к введенной ранее условной единице времени ( $\tau_q$ ), то получим

$$M^* = M\tau_q = 2n(1 - fh)A_q + nhqA_u / \gamma. \quad (3)$$

### Численные результаты

В графическом виде зависимость  $R^* = f(h, q)$ , полученная с помощью расчетов по формуле (2), представлена на рис. 1. Эти расчеты, которые позволяют выявить общий характер изменения времени реакции рассматриваемой ИС в  $(h, g)$ -пространстве, производились при следующих значениях остальных параметров, характеризующих структуру системы и происходящие в ней процессы:  $n = 150$ ;  $A_u = 0,2$ ;  $A_q = 0,005$ ;  $f = 5$ ;  $\beta = 20$ ;  $\gamma = 2$ ;  $\omega = 0,15$ ;  $g = 60$ .

Чтобы более детально исследовать, каким образом среднее время обработки запроса зависит от величины  $h$ , определяющей размер локальной БД (то есть степень репликации данных), рассмотрим семейство кривых на рис. 2 для нескольких фиксированных значений индекса когерентности данных ( $q$ ). Перед анализом этих результатов напомним, что  $h = 0$  означает полное отсутствие локальных БД, то есть все поисковые запросы от пользователей рабочих станций проходят обработку в центральном узле. Если  $h = 0,2$ , то каждая рабочая станция содержит 20% данных из состава центральной БД, и при заданном значении  $f = 5$  все поисковые запросы будут обслуживаться локально.

Если  $q = 1$ , то для каждого объекта БД его локальная копия не должна отличаться от своего оригинала. В этом случае (при выбранных параметрах системы) репликация данных не всегда целесообразна, что обусловлено несколькими противодействующими факторами. В частности, по мере увеличения  $h$  нагрузка, создаваемая обработкой поисковых запросов, постепенно переносится с центрального узла на рабочие станции. Однако при этом на центральном узле увеличивается объем работы по рассылке сообщений для обновления данных, хранящихся в локальных БД. Кроме того, при  $h \rightarrow 0,2$  начинает возникать эффект перегруженности рабочих станций, которые помимо обслуживания поисковых запросов от своих пользователей должны еще производить

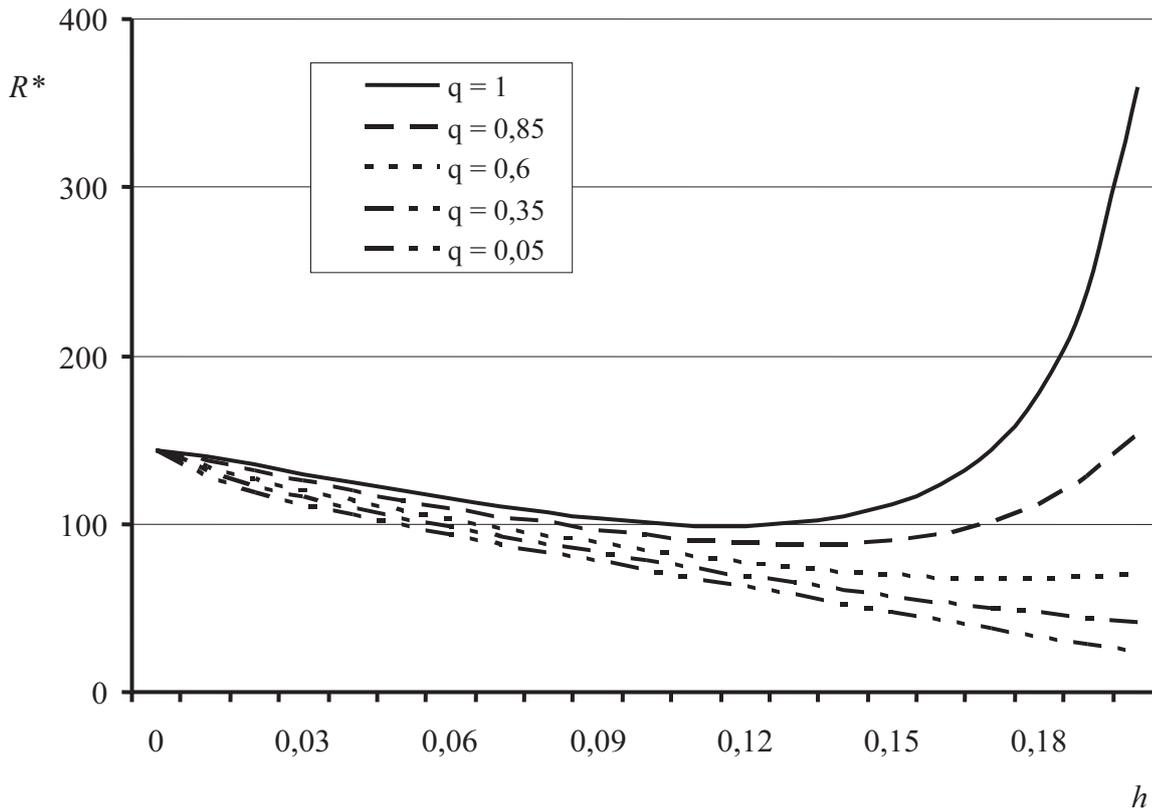


Рис. 2.

обновление локальных данных. Наилучшим вариантом является  $h = 0,117$ , когда за счет репликации данных время реакции системы ( $R^* = 98,7$  у.е.в.) почти в 1,5 раза снижается по сравнению с  $R^* = 144$  у.е.в. при  $h = 0$ .

При уменьшении  $q$  ситуация существенно меняется: любая копия, которая хранится в ЛБД, может отличаться от своего оригинала в ЦБД, поэтому уже не требуется при каждом обновлении оригинала рассылать корректирующие сообщения. Следовательно, из-за снижения затрат на поддержку согласованности тиражируемых данных ускоряется обработка поисковых запросов: когда  $q = 0,85$ ; время реакции системы достигает минимального значения  $R^* = 87,9$  у.е.в. при  $h = 0,132$ . Дальнейшее снижение требований к когерентности тиражируемых данных ( $q \leq 0,6$ ) приводит к тому, что локальная обработка всех запросов от пользователей рабочих станций ( $h = 0,2$ ) становится наилучшим вариантом. В результате обеспечивается существенное повышение скорости обработки запросов: к примеру, для  $q = 0,35$  величина  $R^* = 41,3$  у.е.в. в 3,5 раза меньше, чем при  $h = 0$ .

Чтобы проследить, каким образом степень репликации данных ( $h$ ) влияет на загруженность

каналов связи (сетевой трафик), рассмотрим соотношение (3) как функциональную зависимость  $M^* = \varphi(h)$ . Эта зависимость относится к типу  $\varphi(h) = ah + b$ , где

$$a = n(qA_u / \gamma - 2fA_q), \quad (4)$$

и  $b = 2nA_q$ . Следовательно, при  $a < 0$  увеличение размера ЛБД будет приводить к снижению сетевого трафика по сравнению с исходным вариантом, который характеризуется отсутствием репликации данных ( $h = 0$ ).

С учетом (4) неравенство  $a < 0$  преобразуется к следующему условию:  $q < 2fA_q\gamma / A_u$ . Для индекса когерентности тиражируемых данных это условие ограничивает область тех значений, при которых обеспечивается выигрыш с точки зрения интенсивности потоков сообщений, передаваемых между центральной БД и рабочими станциями.

Для иллюстрации выявленных закономерностей, которые относятся к процессам обмена данными между отдельными элементами рассматриваемой ИС, на рис. 3 представлены графические зависимости  $M^* = \varphi(h)$  при нескольких значениях  $q$ . Остальные параметры, входящие в соотношение (2), сохраняли указанные ранее значения.

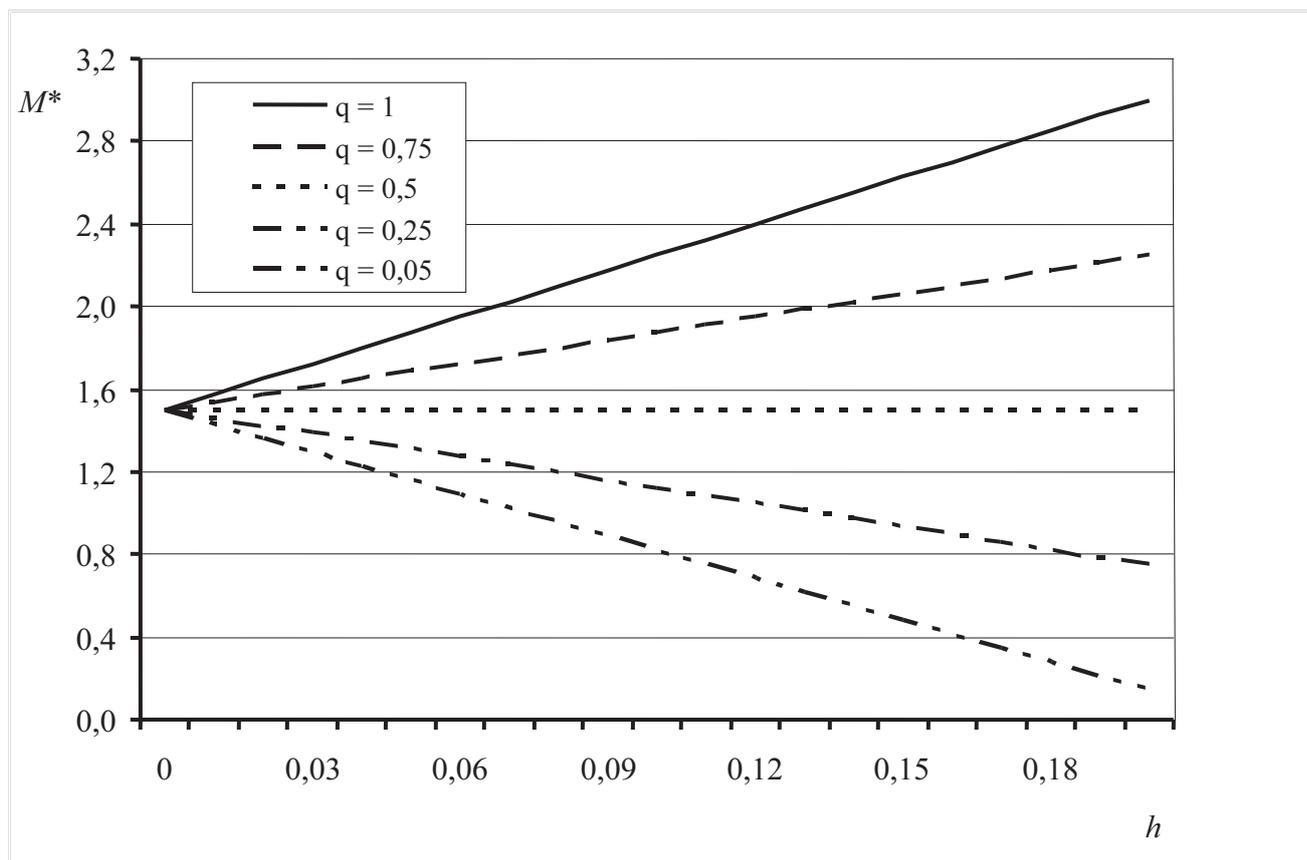


Рис. 3.

### Заключение

В крупных ИС с распределенной архитектурой репликация данных обеспечивает целый ряд важных преимуществ: увеличение доступности данных и надежности системы (поскольку при потере соединения с одним из серверов работа может продолжаться с идентичными данными на другом сервере); более равномерное распределение нагрузки по разным серверам; ускорение доступа к локальным данным и др. Вместе с тем, синхронная репликация предъявляет дополнительные требования к сетевым ресурсам и негативно влияет на производительность системы, поэтому все более популярным становится режим асинхронной репликации. Асинхронная репликация менее чувствительна к низкой пропускной способности каналов связи, допускает использование более дешевых технологий передачи данных и может происходить по расписанию (например, раз в сутки в ночное время) при отсутствии постоянного соединения с главной БД, но все это приводит к несоответствиям (расхождениям) между копиями данных и их оригиналами.

Таким образом, ввиду того, что разные технологии репликации данных обладают опреде-

ленными достоинствами и недостатками, вопрос выбора наиболее рационального варианта организации внутрисистемных средств тиражирования данных в составе распределенной ИС требует тщательного изучения с использованием соответствующих математических моделей. В статье представлена одна из таких моделей для двухуровневой системы, построенной по архитектуре «клиент-сервер».

### Литература

1. Таненбаум Э., Ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. СПб.: Питер, 2003. – 877 с.
2. Барон Г., Ладыженский Г. Технология тиражирования данных в распределенных системах // Открытые системы. №2, 1994. – С. 17-22.
3. Коржов В. Базы данных идут в тираж // Системы управления базами данных. №3, 1998. – С. 60-64.
4. Калиниченко Б. Асинхронное тиражирование данных в гетерогенных средах // Системы управления базами данных. №3, 1996. – С. 50-54.