

Введение в базы данных

6 января 2022 г.

Содержание

1	Теория	2
1.1	Реляционная алгебра. Предназначение и свойства	3
1.2	Реляционная алгебра. Унарные и множественные операции	5
1.2.1	Проекция	5
1.2.2	Фильтрация	6
1.2.3	Переименование	8
1.2.4	Множественные операции	8
1.3	Транзакции. Восстановление. Классический алгоритм	11
1.3.1	Транзакции	11
1.3.2	Восстановление	12
1.3.3	Классический алгоритм восстановления	14
1.4	Репликация	16
2	Практика	18

1 Теория

1.1 Реляционная алгебра. Предназначение и свойства

Базы данных нужно уметь не только проектировать, но и использовать. Существует несколько способов формулировать запросы. Первый из рассматриваемых – *реляционная алгебра*.

Мотивация Действительно, в базах данных можно не только хранить данные, но и делать выборки, изменять их каким-либо образом. Для этого вводится понятие запроса. При первом рассмотрении, запросы нужны как минимум для выполнения следующих действий:

- Выборка данных: получить данные из базы, чтобы тем или иным способом обрабатывать их уже извне.
- Область действия обновлений: запросы позволят указывать область действия тех или иных операций, что крайне полезно. Например, к таким операциям относятся операции удаления или изменения данных: хочется указывать, на какие именно записи эти операции подействуют.
- Ограничения целостности: до сих пор было только два вида ограничений (ключи и внешние ключи). Некоторые базы данных позволяют создавать произвольные ограничения целостности, заданные на поддерживаемом языке. В рамках этих ограничений очень удобно пользоваться запросами.
- Ограничения доступа.

Определение. *Реляционная алгебра* – алгебра над множеством всех отношений.

Далее будут определены некоторые из операций (которые по определению должны быть замкнуты над носителем), и ограничения, которые им соответствуют. В целом, реляционная алгебра – императивный язык для работы с отношениями, который позволяет в явном виде, по действиям, описать, каким именно образом должен быть получен результат.

Примеры Рассмотрим несколько простых примеров операций в рамках реляционной алгебры.

- Проекция отношения на множество атрибутов: $\pi_A(R)$;
- Естественное соединение $R_1 \bowtie R_2$.

Замечание. Как уже говорилось, все операции в рамках алгебры замкнуты по определению. Это означает, что их можно комбинировать произвольным образом (при сохранении условий на возможность исполнения операции). Например: $\pi_A(R_1 \bowtie \pi_B(R_2)) \bowtie R_3$.

Операции В текущем контексте полезно уточнить, что именно понимается под операцией над отношениями в рамках реляционной алгебры. А именно, для того, чтобы определить операцию, необходимо определить следующее:

- Правило построения заголовка по заданным отношениям;
- Правило построения тела по заданным отношениям;
- Условия, при которых операция выполнима, то есть ограничения на отношения, к которым она применяется.

1.2 Реляционная алгебра. Унарные и множественные операции

В этом разделе будут описаны унарные операции в рамках реляционной алгебры. В соответствии с определением, для определения каждой операции нужно указать способ построения заголовка, тела отношения, а также условия применимости, если такие есть.

1.2.1 Проекция

Определение. *Проекцией* отношения R на множество атрибутов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ называется отношение, полученное из исходного путем удаления атрибутов не из A . Обозначается $\pi_A(R)$.

Данная операция может быть полезна для следующего:

- Привести отношение к виду, в котором над ним можно будет осуществить другую операцию (например, объединение);
- Выбрать из отношения только нужные данные (для выборки).

На рисунке 1 приведена иллюстрация к определению $\pi_{A_2, A_4, A_5}(A)$.

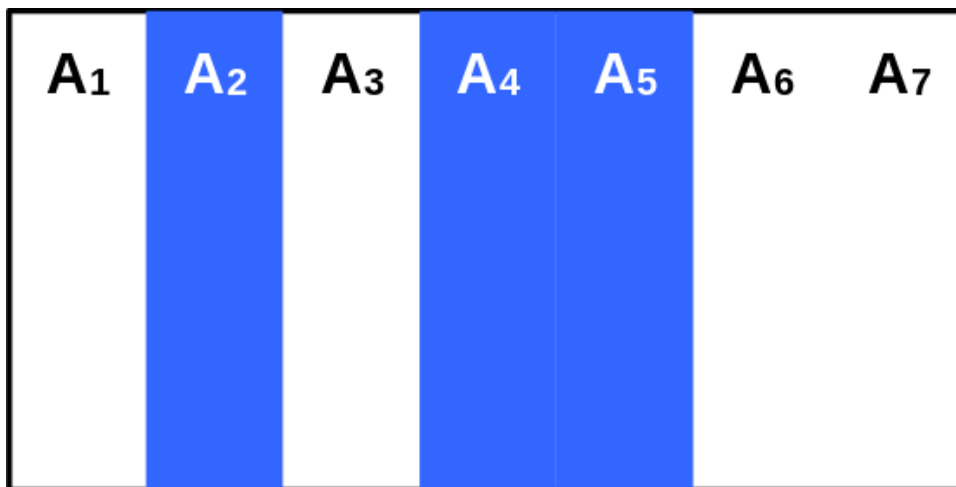


Рис. 1: Иллюстрация к определению проекции

Синим здесь обозначены столбцы, которые есть в результате операции. Остальные столбцы не используются, и результат никак не зависит от их содержимого.

Примеры Приведем несколько тривиальных примеров применения проекции.

- $\pi_{FirstName, LastName}$

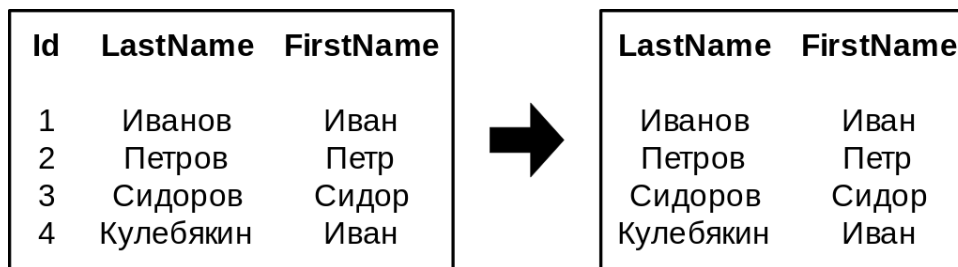


Рис. 2: Проекция. Пример 1

- $\pi_{FirstName}$

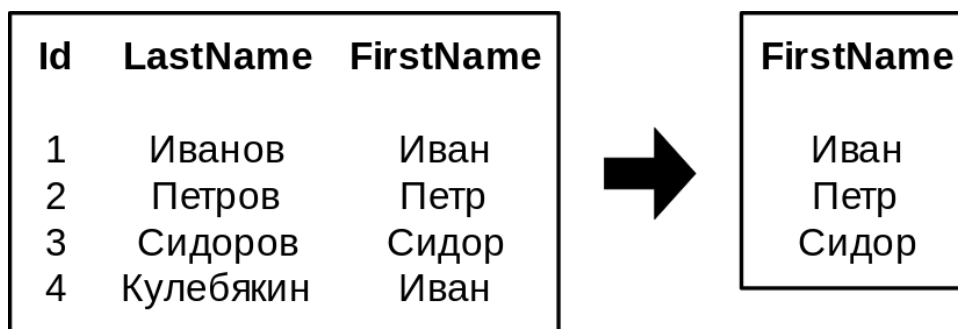


Рис. 3: Проекция. Пример 2

1.2.2 Фильтрация

Определение. *Фильтрацией (селекцией, выборкой из)* отношения R называется отношение, чей заголовок полностью совпадает с заголовком R , но тело содержит только кортежи, удовлетворяющее условию s . Обозначение: $\sigma_c(R)$.

Операция часто используется для

- Ограничения области действия изменяющих запросов;
- Получения выборки данных, соответствующих определенному условию.

На рисунке 4 приведена иллюстрация к определению $\sigma_c(R)$.



Рис. 4: Иллюстрация к определению фильтрации

Синим здесь обозначены столбцы, которые есть в результате операции. Остальные столбцы не используются, и результат никак не зависит от их содержимого.

Примеры Приведем несколько тривиальных примеров применения фильтрации.

- $\sigma_{Id>2}$

Id	LastName	FirstName
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Кулебякин	Иван

➔

Id	LastName	FirstName
3	Сидоров	Сидор
4	Кулебякин	Иван

Рис. 5: Фильтрация. Пример 1

- Можно писать более сложные условия. $\sigma_{Id>2 \wedge FirstName=Иван}$

Id	LastName	FirstName
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Кулебякин	Иван

➔


Id	LastName	FirstName
4	Кулебякин	Иван

Рис. 6: Фильтрация. Пример 2

- Можно использовать функции, доступные в используемой БД.

$\sigma_{\text{length}(FirstName)+2 \geq \text{length}(LastName)}$

Id	LastName	FirstName
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Кулебякин	Иван



Id	LastName	FirstName
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор

Рис. 7: Фильтрация. Пример 3

1.2.3 Переименование


Определение. *Переименованием* называется операция, при которой меняются названия атрибутов отношения. Тело при этом остается неизменным.

Операция часто применяется для того, чтобы отношение можно было использовать в рамках другой операции (например, при объединении с другим отношением).

Примеры Ниже приведен тривиальный пример-пояснение для операции переименования.

- $\rho_{Name=FirstName, Surname=LastName}$

Id	LastName	FirstName
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Кулебякин	Иван



Id	Surname	Name
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Кулебякин	Иван

Рис. 8: Переименование. Пример

1.2.4 Множественные операции

Из теории множеств в реляционную алгебру естественным образом переходят операции:

- $R_1 \cup R_2$ – объединение.
- $R_1 \cap R_2$ – пересечение.
- $R_1 \setminus R_2$ – разность.

Эти операции по определению применимы только к отношениям с одинаковыми заголовками. В результате получается отношение с таким же заголовком и телом, полученным в соответствии с множественной операцией. Иначе говоря, заголовок остается тем же, а над телами отношений производится соответствующая множественная операция (объединение, пересечение, вычитание и прочие).

Примеры

- Объединение отношений: $R_1 \cup R_2$

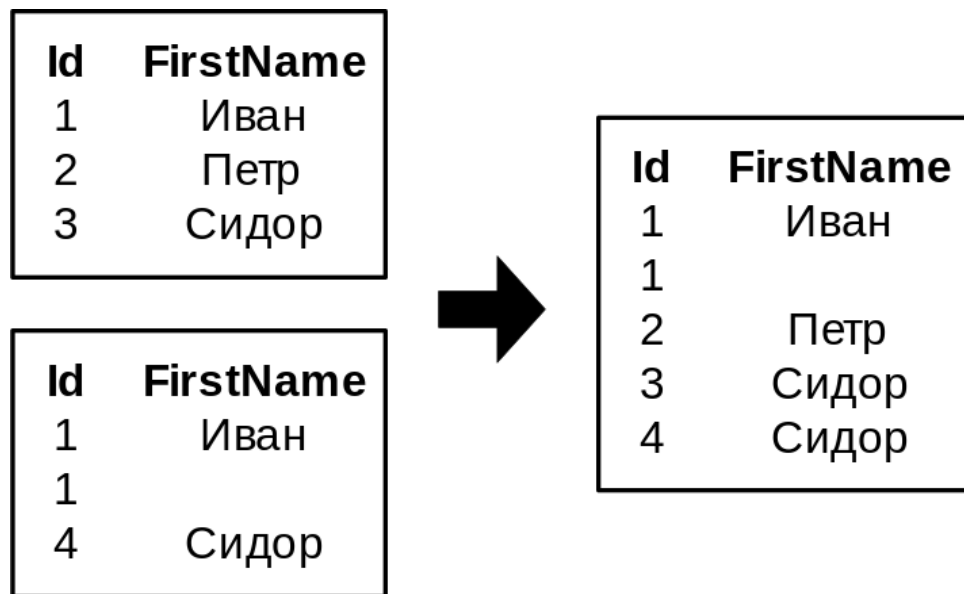


Рис. 9: Объединение отношений

- Пересечение отношений: $R_1 \cap R_2$

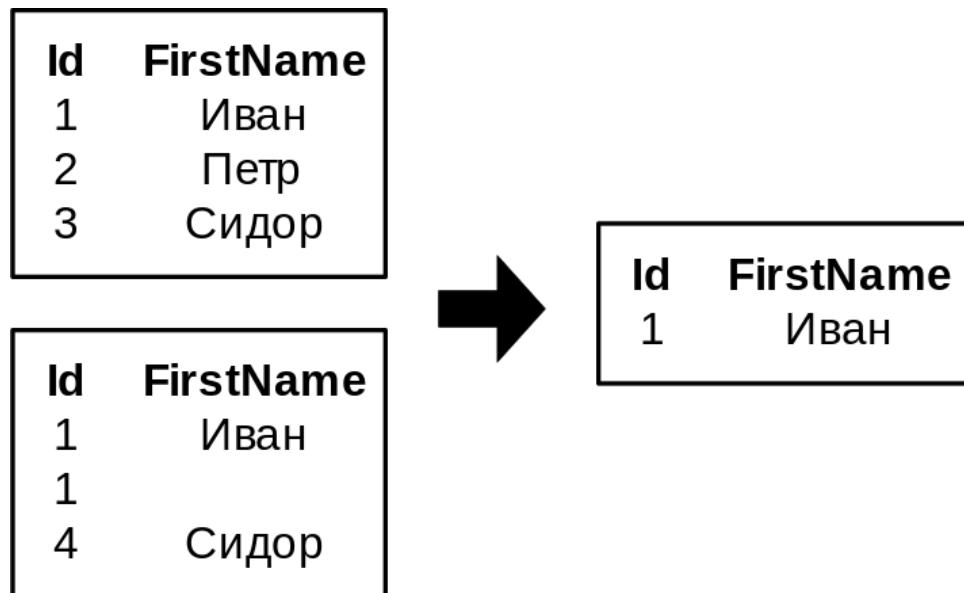


Рис. 10: Пересечение отношений

- Разность отношений: $R_1 \setminus R_2$

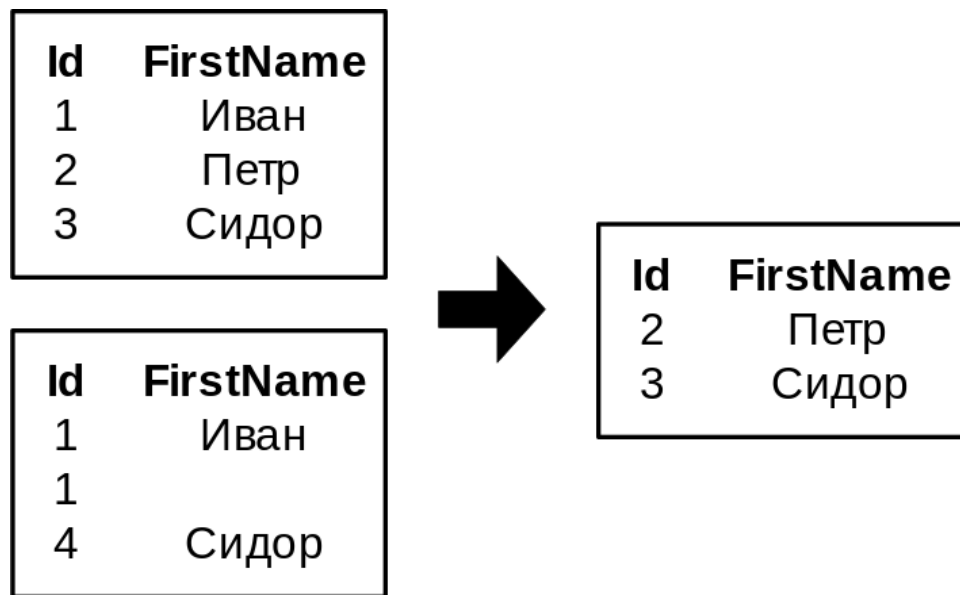


Рис. 11: Разность отношений

Стоит отметить, что для объединения отношений с различающимися именами атрибутов, но при равном их количестве, можно воспользоваться переименованием для того, чтобы привести заголовки к одному виду.

1.3 Транзакции. Восстановление. Классический алгоритм

1.3.1 Транзакции

Определение. *Транзакция* – минимальный объем работы, который можно зафиксировать в базе данных.

Каждый оператор заключен в неявную транзакцию, которая начинается непосредственно перед оператором и заканчивается после него. Не все действия в СУБД являются транзакционными. Например, во многих реализациях не поддерживается транзакционное изменение схемы данных.

Свойства транзакций (ACID)

Определение. *Атомарность (Atomicity)* – с точки зрения БД, транзакция либо выполняется целиком, либо полностью откатывается. Иначе говоря, никто со стороны не может увидеть промежуточное состояние выполнения транзакции.

Определение. *Согласованность (Consistency)* – после завершения транзакции БД остается в согласованном состоянии.

Определение. *Изоляция (Isolation)* – транзакции не могут взаимодействовать между собой. Это означает, что транзакции не могут пользоваться промежуточными результатами друг друга.

Определение. *Устойчивость (Durability)* – при успешном завершении транзакции результаты ее исполнения сохраняются в БД, при откате транзакции все внесенные ею изменения отменяются.

Корректность и согласованность

Определение. Состояние БД является *согласованным*, если оно удовлетворяет всем объявленным ограничениям. Это свойство автоматически проверяется СУБД.

Определение. Состояние БД является *корректным*, если оно соответствует реальному миру. Автоматически проверено быть не может.

Существуют условия корректности, которые нельзя проверить ограничениями. Например, после перевода денег в банке их общая сумма в системе не должна измениться. Однако, эта сумма заранее неизвестна, поэтому заранее задать ограничение невозможно.

Минимизация транзакций Транзакции требуют большие ресурсные затраты, поэтому должны быть минимальными. По возможности следует использовать неявные транзакции.

Однако, есть типичные ситуации, в которых использования неявных транзакций недостаточно:

- *Условное обновление* – проверку условия и обновление необходимо сделать в рамках одной транзакции, в противном случае в момент изменения условие может перестать выполняться;
- *Множественное обновление* – при обновлении данных, особенно в различных таблицах, использование транзакции необходимо для исключения несогласованности;
- *Промежуточная несовместимость* – некоторые действия требуют временного нарушения согласованности с последующим его восстановлением, использование транзакций позволяет откладывать проверку согласованности до завершения всех действий и исключают видимость несогласованного состояния другими пользователями.

Также следует отметить, что результат завершения транзакции **не должен зависеть от человека**. Человеческий фактор может привести к зависшей транзакции. Если требуется принятие решения от человека, транзакцию следует разбить на две: первая читает данные, а вторая их записывает, предварительно проверяя данные на соответствие результату первой. В таком случае от решения человека зависит применение второй транзакции.

1.3.2 Восстановление

Напомним, что свойство *устойчивости (durability)* транзакции подразумевает сохранение результатов транзакции в БД даже при сбоях.

Хранение данных в оперативной памяти может приводить к потерям, например, при перезагрузке. Это считается нормальным, что приводит к необходимости хранения информации на дисках. Напомним, что с диска быстрее читать данные последовательно.

Типы сбоев

- **Локальный.** Сбой одной транзакции. Для восстановления достаточно откатить затронутую транзакцию.
- **Глобальный.** Сбой процесса СУБД, затрагивает все транзакции. Для восстановления достаточно откатить все незавершенные транзакции, а также заново применить все успешно завершённые транзакции.
- **Аппаратный.** Например, перезагрузка компьютера. С точки зрения СУБД, не существенно отличается от глобального сбоя.
- **Отказ оборудования.** СУБД не может восстановиться после этого типа сбоя. Однако, многие СУБД предоставляют *средства* для восстановления (например, запись данных на несколько дисков и синхронизация копий).

Свойство устойчивости не является абсолютным. Существуют сбои, при которых его нельзя поддержать.

Восстановление после сбоя Для восстановления БД достаточно сделать следующее:

- Успешные транзакции – зафиксировать;
- Откаченные транзакции – откатить;
- Незавершенные транзакции – откатить.

Существует несколько популярных подходов для отката:

Shadow copy Каждая транзакция пишет данные в новое место. При успешном завершении транзакции копия помечается успешной, пользователь уведомляется об успешной транзакции, и начинается запись из копии в БД. При сбое во время записи производится повторная запись. Проблема подхода заключается в частых чтениях и записях shadow copy, которые расположены в случайных местах на диске, что медленно.

Transaction log Данные пишутся сразу в БД, параллельно записывая изменения, примененные в рамках каждой транзакции, в журнал. Данный подход более популярен.

Журнал записывается в надежное хранилище изменений. Это означает, что его утрата есть невозстановимый сбой. Однако, записи ведутся последовательно, что делает данный подход быстрее предыдущего.

В журнал записываются: старые данные, новые данные, маркеры начала и завершения транзакции.

При завершении транзакции все изменения записываются в журнал, записывается маркер завершения транзакции, пользователь уведомляется о завершении транзакции.

Реализация журнала

- **Постоянная запись на диск.** При записи каждого изменения в журнал существенно возрастает число операций, конкуренция за доступ к диску, а также накапливаются откаченные транзакции, которые в будущем не принесут пользы.
- **Запись при завершении.** В журнал при завершении транзакции записываются порожденные изменения. При больших изменениях это приводит к росту потребления памяти журналом.
- **Точки восстановления.** В журнал периодически записывается "слепок" состояния системы: текущие изменения, завершённые транзакции (не записанные ранее), откаченные транзакции (не записанные ранее), открытые транзакции. Создание точки восстановления требует приостановки изменений.

Структура журнала С использованием механизма точек восстановления, получаем следующую структуру журнала.

- **Точка восстановления;**
- **События:**
 - Идентификатор транзакции,
 - Указатель на *предыдущее* событие транзакции:
 - * Начало транзакции,
 - * Изменение,
 - * Завершение транзакции,
 - * Откат транзакции.

Примеры Рассмотрим пример сбоя и определим, что должно произойти с каждой из транзакций.

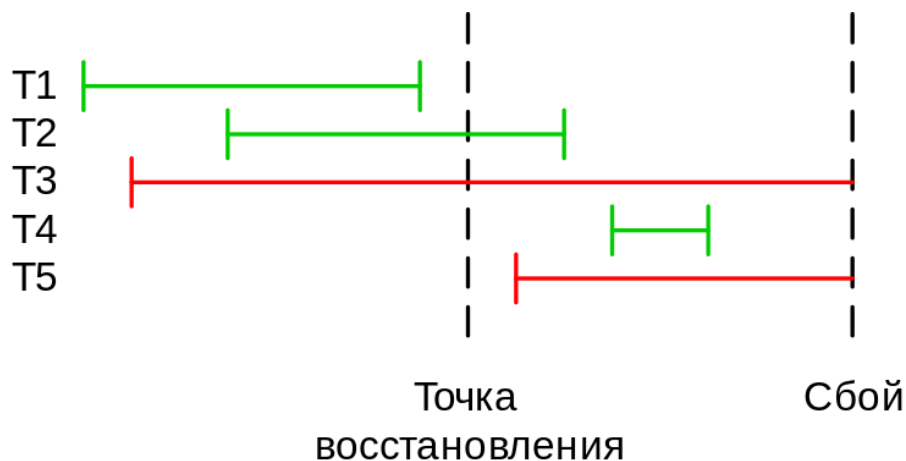


Рис. 12: Иллюстрация к определению проекции

Зеленым и красным цветом отмечены транзакции, которые должны быть завершены или откатены соответственно при восстановлении. Отметим, что эти решения однозначно определены гарантиями ACID транзакций.

1.3.3 Классический алгоритм восстановления

Фазы алгоритма

- **Разметка транзакций.** Каждая транзакция отмечается как *Redo* или *Undo*.
- **Откат транзакций.** Для помеченных как *Undo*.
- **Повтор транзакций.** Для помеченных как *Redo*.

Фаза разметки транзакций

- Чтение журнала идет от последней точки восстановления до конца. Все открытые транзакции помещаются в *Undo*.
- При чтении маркера начала транзакция добавляется в *Undo*.
- При чтении маркера конца транзакция переносится из *Undo* в *Redo*.

Фаза повторения транзакций

- Чтение журнала идет от последней точки восстановления до конца.
- При чтении маркера конца транзакция удаляется из *Redo*.
- При чтении изменения оно применяется, если транзакция в *Redo*.

Утверждение 1.1. После успешного выполнения всех фаз БД находится в корректном состоянии и гарантирует выполнения свойства устойчивости.

Утверждение 1.2. Рассмотрим все открытые транзакции. Для каждой из них найдем ближайшую точку восстановления из будущего. Все данные до самой ранней точки восстановления из рассматриваемых можно удалить, поскольку они не понадобятся при восстановлении.

1.4 Репликация

Определение. Репликация – поддержание одинаковых данных на нескольких узлах.

1.4.1 Реализация репликации

Репликация бывает **синхронной** (с использованием распределенных транзакций) и **асинхронной** (информация до реплик доходит с задержками). С другой стороны, различают схемы репликации с **основной копией** и **симметричную**.

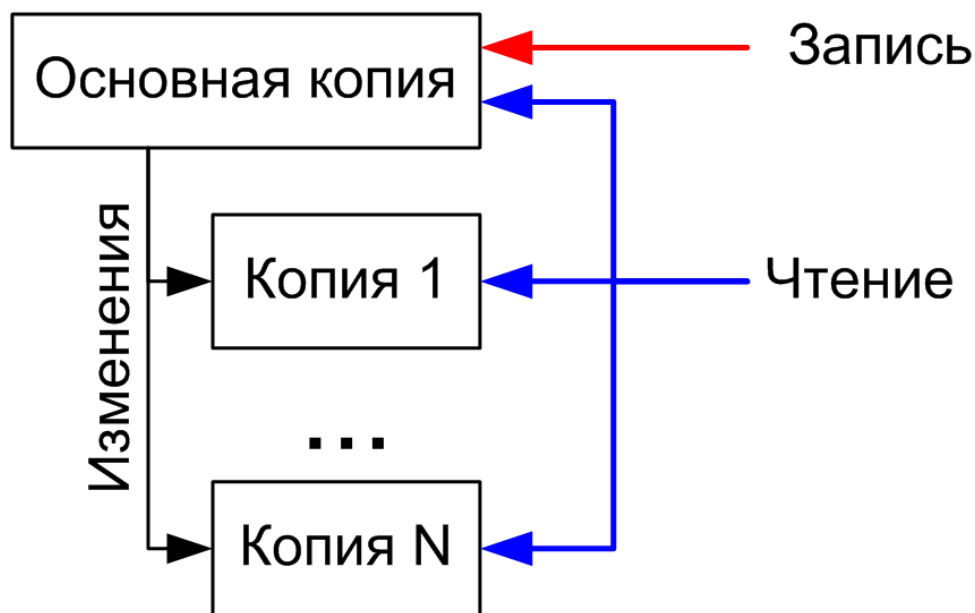


Рис. 13: Схема репликации с основной копией

Репликация с основной копией Чтение данных можно производить из любой копии БД, в то время как запись – только в основную. Согласованность всех копий обеспечивается за счет проверки при записи в основную копию. Данная схема подходит, если число записей сильно меньше числа чтений.

Симметричная репликация Чтение и запись производятся в каждую копию независимо, все копии равноправны и автономны. Для борьбы с противоречивыми изменениями в данной схеме требуется синхронность изменений.

Реализация репликации Данные об изменениях можно рассылать из журнала транзакций. Можно рассылать данные в различной гранулярности:

- **Репликация операторов.** При таком подходе используется меньше данных. Однако, каждый оператор должен быть детерминированным, а также необходимо учитывать взаимный порядок выполнения транзакций. Сложно для реализации.

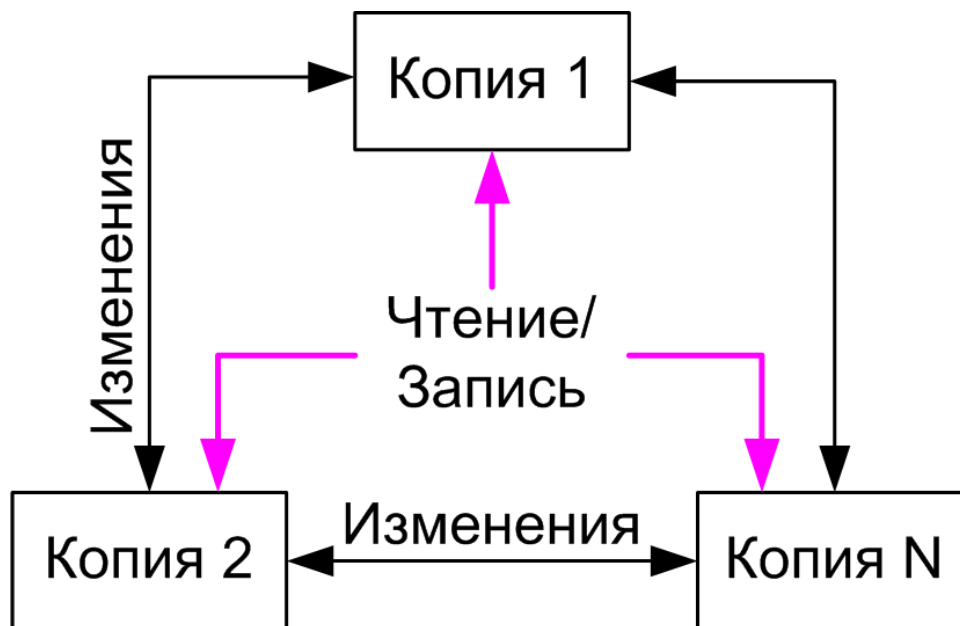


Рис. 14: Схема симметричной репликации

- **Репликация записей.** Рассылается информация об изменении отдельных записей. При таком подходе нет требования к детерминированности. Однако, крупные обновления данных приведут к рассылке больших сообщений.

1.4.2 Применения репликации

Вертикальное масштабирование При необходимости вертикального масштабирования (наращивания мощности системы) следует использовать **асимметричную схему**. Напомним, что ее использование целесообразно, когда количество изменений гораздо меньше количества чтений.

Применяется в ситуациях, когда допустима асинхронность. Например, в Web-серверах и ERP-системах.

Горизонтальное масштабирование В ситуациях, когда необходимо производить множество локальных операций, например, в разных географических областях, применяется **симметричная схема**. Каждая реплика отвечает за определенные данные в зависимости от запроса. Также этот подход полезен в случае постоянной связи.

Повышение доступности Для повышения доступности данных следует использовать **асимметричную схему**, которая позволяет менять основную реплику при выходе из строя прошлой. В случае синхронной репликации потери данных отсутствуют, однако, в случае асинхронной вышедшая из строя основная реплика могла не успеть разослать другим репликам изменения.

Также полезно **резервное копирование БД**. В асимметричной схеме для этого достаточно создать реплику, с которой постоянно синхронизируется основная. Для

создания резервной копии достаточно отключить такую реплику, скопировать данные, включить обратно в систему и восполнить пропущенные обновления.

Преобразование данных Используется **асимметричная схема**, которая предоставляет отлаженный способ получения всех изменений данных. На основе них можно строить преобразование данных: изменение формата хранения, консолидация, унификация, подсчет статистики и так далее. Таким образом, преобразования происходят при репликации.

2 Практика