

Введение в базы данных

6 января 2022 г.

Содержание

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

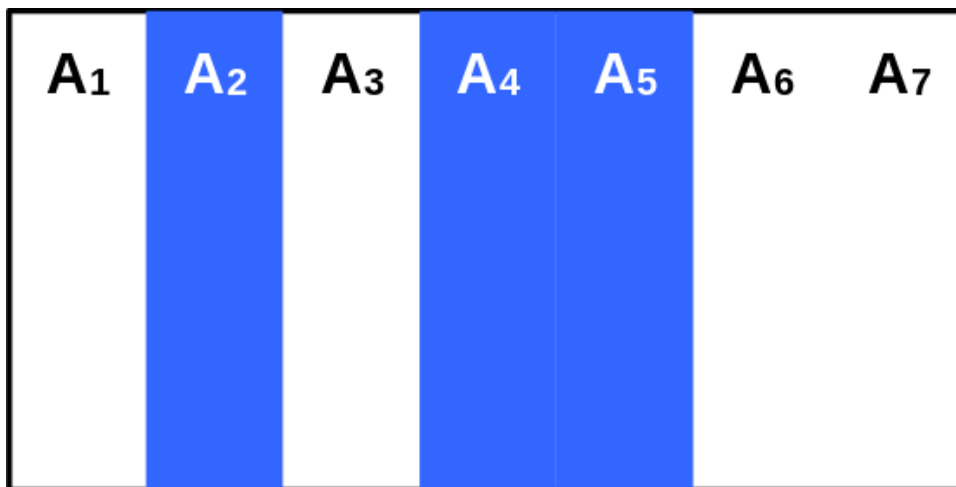


Рис. 1: Иллюстрация к определению проекции

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.

- $\pi_{FirstName, LastName}$

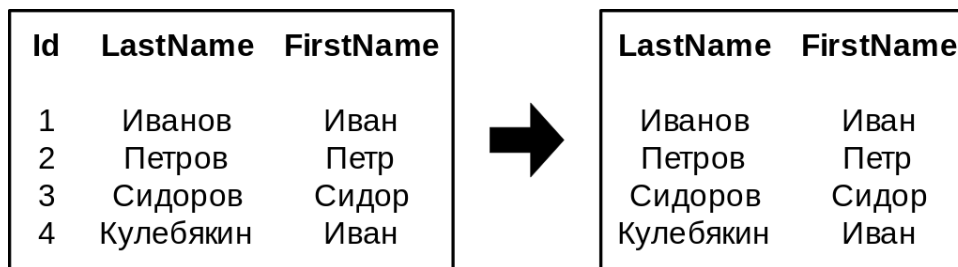


Рис. 2: Проекция. Пример 1

- $\pi_{FirstName}$

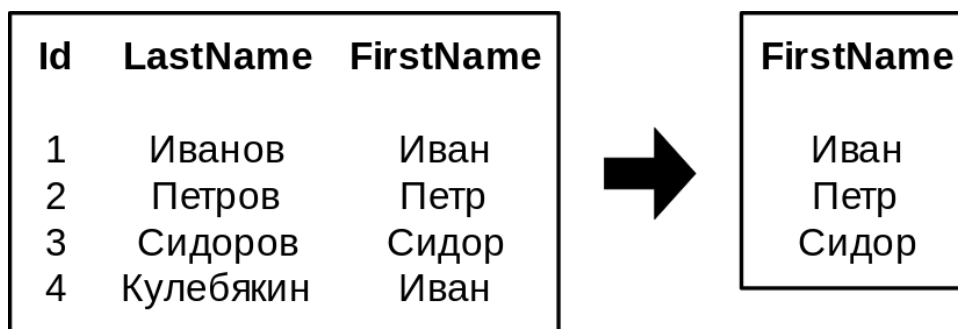


Рис. 3: Проекция. Пример 2

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 ?? приведена иллюстрация к определению $\sigma_c(R)$.

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7

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: $R_1 \cup R_2$

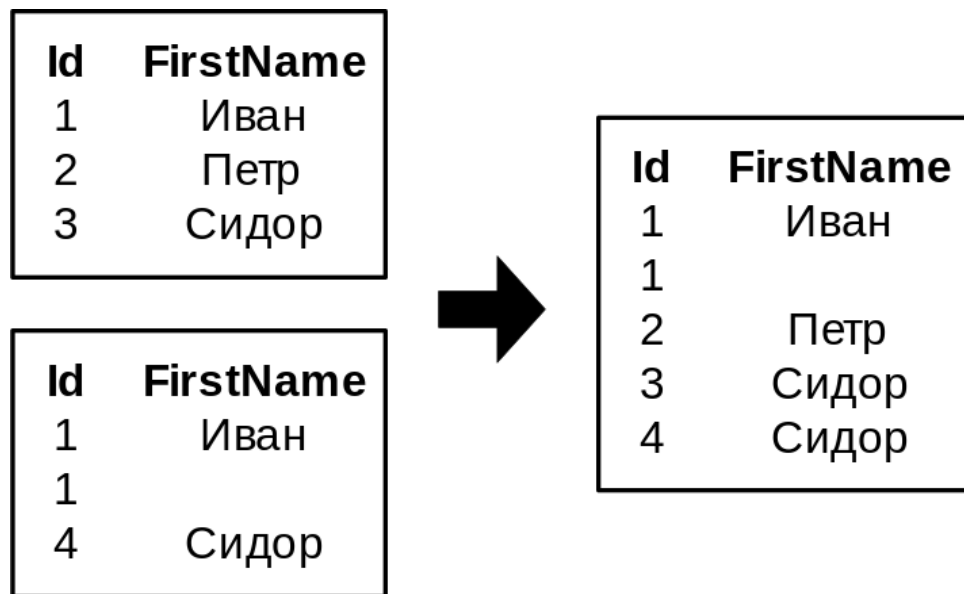


Рис. 9: Объединение отношений

- Пересечение отношений: $R_1 \cap R_2$

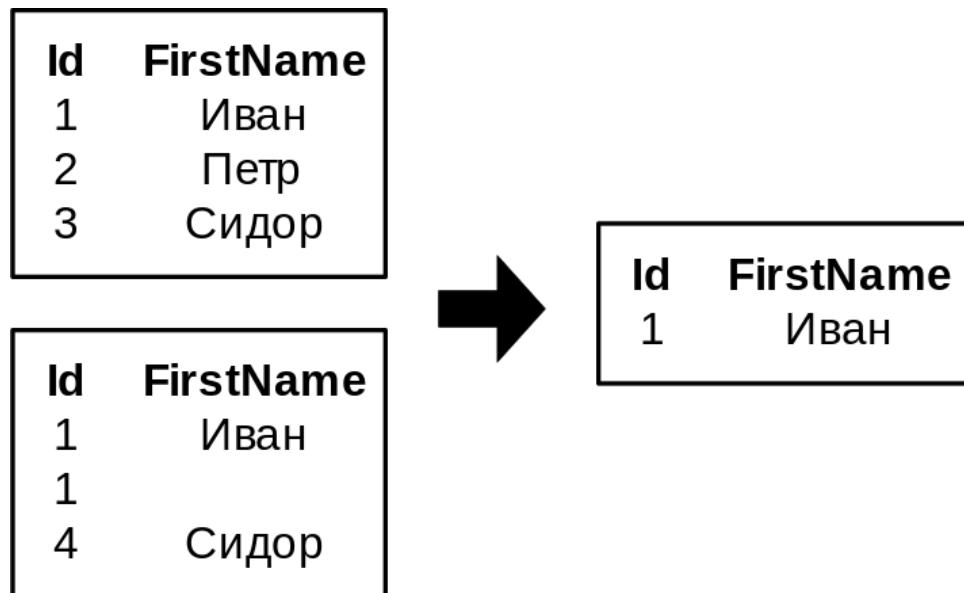


Рис. 10: Пересечение отношений

- Разность отношений: $R_1 \setminus R_2$

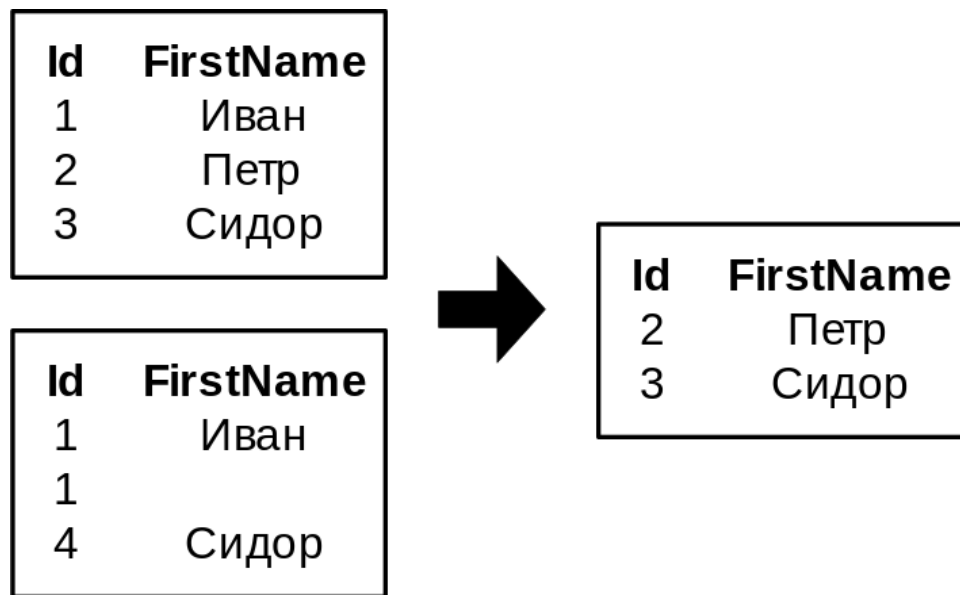


Рис. 11: Разность отношений

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, завершенные 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.

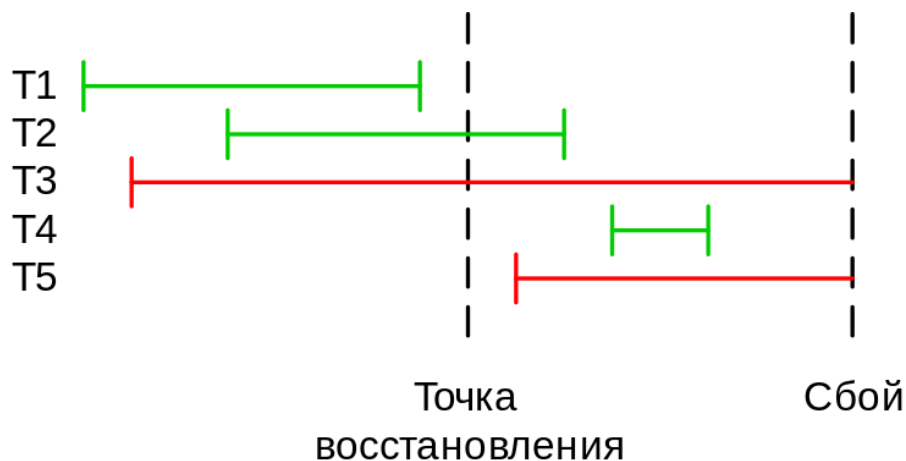


Рис. 12: Иллюстрация к определению проекции

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 отката транзакций

- Чтение журнала идет от конца к началу, пока множество *Undo* не пусто.
- При чтении маркера начала транзакция удаляется из *Undo*.
- При чтении изменения оно откатывается, если транзакция в *Undo*.

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.

1.3.4 Отказ оборудования

До этого были рассмотрены методы восстановления при глобальном или аппаратном сбое. Рассмотрим методы борьбы с последствиями отказа оборудования.

Репликация данных Несколько БД, которые содержат одинаковые данные. Обычно разнесены географически. В процессе работы необходимо поддерживать синхронность данных на копиях, что приводит к необходимости использования распределенных транзакций. Реализация последних – технически сложная задача. При отказе достаточно назначить основной БД любую из оставшихся копий.

Избыточность оборудования Одна БД, которая работает параллельно с несколькими дисками или RAID. Запись происходит параллельно на каждое ПЗУ. При отказе диска достаточно его заменить и скопировать на него данные с другого диска или положиться на алгоритмы RAID при его использовании.

Резервное копирование Вся БД периодически копируется в отдельное хранилище. Для корректности копирования требуется приостановка обновлений данных. При отказе достаточно скопировать данные из резервной копии. Стоит отметить, что при этом данные будут актуальными на момент создания копии, поэтому при необходимости и возможности следует произвести повторное внесение данных.

1.4 Транзакции. Параллельное исполнение. Уровни изоляции.

Уровни изоляции транзакций Мы рассматриваем следующие уровни изоляции транзакций. Все, кроме “Слепок”, определены в стандарте SQL.

- Упорядочиваемый (serializable),
- “Слепок” (snapshot),
- Повторяемое чтение (repeatable read),
- Чтение зафиксированных (read committed),
- Чтение незафиксированных (read uncommitted).

1.4.1 Упорядочиваемый

Дает наиболее сильные гарантии с самой низкой скоростью исполнения. Детали реализации были рассмотрены в предыдущем билете.

1.4.2 “Слепок”

Каждая транзакция работает со своим “слепоком” БД. Вносит изменения в режиме сору-on-write. При реинтеграции изменений они фиксируются, при отсутствии конфликтов изменений.

Является аналогом упорядочиваемого уровня изоляции с меньшими гарантиями, используется в базах-“версионниках”, в которых синхронизация основана на версиях вместо блокировок.

Аномалия “косая запись” На данном уровне изоляции возможна аномалия “косая запись”. Она возникает при одновременном обновлении разных записей, которые вместе должны гарантировать некоторый инвариант.

Пример. Положим инвариант $t_1 + t_2 \geq 0$.

- Транзакция 1

```
if t_1 + t_2 >= DELTA begin
    t_1 = t_1 - DELTA
end if
```

- Транзакция 2

```
if t_1 + t_2 >= DELTA begin
    t_2 = t_2 - DELTA
end if
```

Реинтеграция изменений пройдет успешно, поскольку записи идут в разные переменные. Однако, при параллельном исполнении инвариант может быть нарушен.

1.4.3 Повторяемое чтение

Уровень изоляции гарантирует, что при повторном чтении значения не будут меняться. Исключение – запись, произведенная самой транзакцией. Реализуется путем взятия блокировок записей или страниц на чтение.

Аномалия “фантомная запись” При повторном чтении могут появиться новые записи. Возможно при параллельном исполнении другой транзакции.

1.4.4 Чтение зафиксированных

Уровень изоляции гарантирует, что читаемые значения зафиксированы другими транзакциями. Реализуется путем взятия *частичных* блокировок записей или страниц на чтение.

Аномалия “неповторяемое чтение” При повторном чтении могут значение записи может измениться. Возможно при параллельном исполнении другой транзакции.

1.4.5 Чтение незафиксированных

На уровне изоляции не используются блокировки, что обеспечивает наивысшую скорость. По стандарту SQL разрешено только чтение. Используется для сбора статистики.

Аномалия “грязное чтение” Может быть прочитано некорректное значение.

1.5 Секционирование

Определение. *Секционирование* – разбиение таблицы на фрагменты, хранящиеся в разных местах (в случае разных компьютеров называется *шардинг*). Используется для увеличения скорости чтения за счет параллельного обращения.

Различают два вида секционирования: **вертикальное** и **горизонтальное**.

1.5.1 Вертикальное секционирование

Таблица разбивается по столбцам. Возможно при корректности соединения (5 НФ). Реализуется посредством проекции и соединения.

Преимущества

- Отделение данных, к которым часто обращаются, от тех, к которым обращаются редко.
- Защита информации.
- Поддерживается во многих СУБД для CLOB и BLOB.

Недостатки

- Нет специальной поддержки в СУБД. Считается, что проекции и соединения для указанных целей достаточно.
- Зависимость от представления (соединенных данных). Некоторые СУБД накладывают ограничения на представления, например, запрещают создавать внешние ключи на них.
- Необходимость обновляемых представлений также не гарантирована.

Пример Рассмотрим исходную таблицу.

```
Students(SId, GId, FirstName, LastName, PassSeries,
        PassNo, PassIssued, Photo)
```

Разобьем ее на секции.

```
StudentData(SId, GId, FirstName, LastName)
StudentPasses(SId, PassSeries, PassNo, PassIssued)
StudentPhotos(SId, Photo)
```

Обращение к фото (StudentPhotos) происходит значительно реже, чем к основным данным студента (StudentData). Также таблица с персональными данными (StudentPasses) требует повышенных прав доступа. Таким образом, были использованы все преимущества вертикального секционирования.

Создадим также представление для работы с исходной таблицей.

```
create view Students as StudentData
    natural join StudentPasses
    natural join StudentPhotos;
```

1.5.2 Горизонтальное секционирование

Таблица разделяется по строкам. Корректно, когда каждая строка попадает ровно в одну секцию. Реализуется посредством фильтрации и объединения.

Преимущества

- Отделение данных, к которым часто обращаются, от тех, к которым обращаются редко. Например, чаще всего старые данные нужны реже новых.
- При уменьшении размера секции уменьшается размер индекса.
- Требуется встроенная поддержка.
- Прозрачно для пользователя.

Недостатки

- В некоторых случаях может приводить к замедлению работы.

Пример Рассмотрим исходную таблицу.

`Points (SId , CId , Points , Date)`

Введем секционирование по Date:

- `Points2021-1` – оценки за весенний семестр 2021,
- `Points2021-2` – оценки за осенний семестр 2021,
- `Points2020-1` – оценки за весенний семестр 2020,
- ...

Методы секционирования

- **Простые.**
 - По диапазонам значений,
 - По значениям,
 - По хешу.
- **По выражению.** Поддерживаются реже.
- **Составные.**
 - По диапазонам и хешу,
 - ...

Пример Секционирование по диапазонам.

```
create table Points (...)  
partition by range(Date) (  
    partition pHist values less than '2021-02-01',  
    partition p2021s1 values less than '2021-07-01',  
    partition p2021s2 values less than '2022-02-01',  
    partition pFuture values less than maxvalue  
);
```

maxvalue – максимальное теоретическое значение.

Пример Секционирование по значениям.

Чаще используется для перечислений.

```
create table Points (...)  
partition by list(Term) (  
    partition pHist values in ('t2020-1', 't2020-2', ...),  
    partition p2021s1 values in ('t2021-1'),  
    partition p2021s2 values in ('t2021-2'),  
    partition pFuture values in ('t2022-1')  
);
```

При таком подходе секция может быть не определена при записи.

```
insert into Points (Term) values ('t2001-1');
```

При чтении из несуществующей секции будет получен пустой результат.

Пример Секционирование по хешу.

Хешируется по набору столбцов. Работает эффективно при хорошей и быстрой хеш-функции.

```
create table Points (...)  
partition by hash(Term)  
partitions 4;
```

Пример Секционирование по выражению.

Зависит от определенной в БД функции.

```
create table Points (...)  
partition by year(Date) (  
    partition pHist values less than 2021,  
    partition pCurrent values less than 2022,  
    partition pFuture values less than maxvalue  
);
```

Пример Составное секционирование.

Секции разбиваются на подсекции, возможно, по разным атрибутам.

```
create table Points (...)  
partition by year(Date)  
subpartition by hash(Term) (  
    partition History values less than 2021 (  
        subpartition History1, subpartition History2  
    ),  
    partition Current values less than 2022 (  
        subpartition Current1, subpartition Current2  
    )  
);
```

Управление секциями

Замечание. Данные команды не входят в стандарт SQL, поэтому синтаксис может отличаться в зависимости от СУБД.

Удаление секции

```
alter table <table> drop partition <section>;
```

Разбиение секции

```
alter table <table> reorganize <section> into (...);
```

Перехеширование

— *Add count of partitions*

```
alter table <table> add partition <count>;
```

— *Delete count of partitions*

```
alter table <table> coalesce partition <count>;
```

Утверждение 1.3. Оптимизатор владеет информацией о секциях. В частности, где какие данные находятся.

```
select * from Points where Date = '2021-12-06'
```

При таком запросе выборка будет производиться только из секции 2021 года.

Секционирование и индексы Можно определить следующие индексы:

- **Локальный** – один на секцию. Ускорение при выборе секций.
- **Глобальный** – один на таблицу. Также ускорение при выборе секций.
- **Секционированный** – разбит на секции. Обеспечивает согласованное секционирование (могут помочь при склеивании секций).

Секционирование и ключи Лучше всего, если множество столбцов, по которым идет секционирование, образует подключ. Еще лучше – подключ всех ключей (например, если внешние ключи на таблицу ссылаются на разные ее ключи).

2 Практика