Средства взаимодействия процессов и потоков

Проблемы в многозадачных и параллельных системах:

Проблема взаимного исключения: Исключить выполнения действий, которые не должны происходить одновременно, например, при выводе документов на печать, где данные должны быть обработаны последовательно.
Проблема синхронизации: Обеспечение правильного порядка выполнения действий между потоками или процессами для корректного взаимодействия и передачи управления между ними.
Проблема обмена данными: вытекает из концепции изолированных адресных пространств – процессы не имеют возможности напрямую обращаться «внутрь» друг друга. Потоки одного процесса действуют в едином адресном пространстве, но в общем случае во взаимодействии могут участвовать потоки разных процессов. Решением всех задач становится использование специальных системных объектов – объектов IPC (Inter-Process Communication) и, как частный случай, ISO (Inter-process Synchronization Objects)

Базовые понятия в параллельном программировании:

Критический ресурс – ресурс системы, который не может использоваться одновременно более чем заданным числом пользователей. Часто речь идет о доступности его не более чем одному пользователю.
Критическая секция – часть алгоритма, где происходят обращения к критическим ресурсам. Очевидно, число потоков, находящихся в критической секции, ограничивается в соответствии с характеристиками критического ресурса (часто – одним потоком).

Требования к критическим секциям: Ограничение количества потоков, ограничение времени пребывания, отсутствие приоритетов внутри секции, независимость от конкретных параметров системы.

IPC (Межпроцессное взаимодействие / Inter-Process Communication) - обмен данными между потоками одного или разных процессов.
Общая классификация IPC:
– **сигнальные** (signal): прерывания, сигналы, сообщения
– **канальные** (pipe): каналы (трубопроводы), почтовые ящики и сокеты различного вида
– **разделяемая память** (shared memory)
– **очереди сообщений** (message queue, MQ) – обладают свойствами сообщений и каналов
– **средства синхронизации** (ISO): семафоры, мьютексы, барьеры
– **комбинированные** (комплексные) решения

Критерии сравнения:
– **масштаб**: межпоточные, межпроцессные, межсистемные
– **функциональность**: синхронизация, обмен данными
– **быстродействие** (для синхронизации)

– **производительность**, пропускная способность (для данных)
– **универсальность**
– **трудоемкость**, уровень поддержки системой

Сигнальные IPC
Пригодны для извещения о событиях или условиях, а также для передачи простых команд. Передача существенных объемов данных затруднена или невозможна.

1. **Прерывания (interrupt) и исключения (exception):**
- Аппаратный уровень, обычно управляется операционной системой.
- Недоступен для прикладных программ.
2. **Сигналы (signal):**
- Предоставляют минимальную информацию: тип сигнала и идентификатор получателя.
- Могут быть аппаратными или программными.
- Часто используются в Unix-системах.
- В Windows их поддержка ограничена и используется редко (signal(), raise()).
3. **Сообщения (message):**
- Более информативны, могут содержать дополнительные параметры.
- Используются для передачи сложной информации и вызовов к другим процессам.
- В Windows существуют **оконные сообщения**, которые могут передаваться синхронно или асинхронно.
- Очереди сообщений поддерживают асинхронное взаимодействие и передачу потока данных между процессами.

ISO (средства синхронизации)
Механизмы синхронизации используются для управления доступом к общим ресурсам. Основная идея заключается в **проверке и изменении флага**, отражающего состояние ресурса (свободен или занят). Однако сами механизмы контроля доступа могут становится **критическим ресурсом** и вызвать зацикливание требований.
Для **обеспечения атомарности операций** с критическими секциями используются **привилегированные операции**, недоступные обычным процессам. Решением может быть использование **системных средств** для гарантии атомарности операций. Другой подход предполагает **временный запрет прерываний** во время доступа к критической секции, но такой метод требует привилегированных инструкций и может усложнить управление вложенными блокировками.

Простейшие решения для обеспечения атомарности включают использование **глобальных флагов** для гарантии правильного выполнения операций. Одним из таких решений является **алгоритм Деккера**.
Спин-блокировка (spinlock) - это метод, при котором процесс ожидает изменения значения переменной, не переходя в режим ожидания. Этот подход обеспечивает высокую скорость выполнения, так как не требуется переключение контекста для выхода из блокировки.

Однако основной недостаток спин-блокировки заключается в постоянной загрузке процессора, так как процесс активно проверяет переменную в цикле. Для выхода из спин-блокировки необходимо, чтобы значение переменной было изменено внешним образом, например, другим потоком или процессором, чтобы разблокировать ожидающий поток.
Семафоры, мьютексы и барьеры - это средства синхронизации в многозадачных системах.
Семафор – глобальная переменная-счётчик (S), которая позволяет управлять доступом к ресурсу с помощью двух операций:
P(S) (уменьшение): если счетчик больше 0, уменьшается на 1; если 0 – поток ждет.
V(S) (увеличение): счётчик всегда увеличивается на 1.
Семафоры позволяют синхронизировать потоки, блокируя их при недоступности ресурса.
Мьютекс – объект для обеспечения взаимного исключения, используется для контроля доступа к критическому ресурсу:
Имеет два состояния: **свободен** и **занят**.
Доступен только один поток одновременно; другие блокируются, пока мьютекс не освободится.
Мьютексы могут быть рекурсивными, что позволяет одному и тому же потоку повторно захватывать его.
Барьер – объект синхронизации, который блокирует потоки до достижения заданного количества запросов:
Используется для синхронного запуска потоков, когда все они достигли определенной точки.
Вариант реализации – счетчик запросов, например, основанный на семафоре.
Эти объекты применяются для координации потоков, особенно при работе с критическими секциями и синхронных задач.

"Блокированные" обращения - потокобезопасная (атомарная) системная реализация операций над переменными, также используется для межпроцессного взаимодействия. Поддерживаемые операции: InterlockedDecrement(), InterlockedIncrement(), InterlockedExchange().

Механизм Critical Section - упрощенный мьютекс для реализации критической секции в рамках одного процесса. Использует структуру CRITICAL_SECTION в адресном пространстве процесса. Функции API: InitializeCriticalSection(), DeleteCriticalSection(). Поддерживает рекурсивное вхождение в секцию.

Функции ожидания WaitFor... - применяются к системным объектам с флагом "signaled". Так, кроме специализированных объектов синхронизации это могут быть процессы, потоки, файлы и проч.
Типичная интерпретация состояния «signaled»:
– Файлы, каналы, устройства ввода-вывода: завершение операции ввода-вывода
– Процессы, потоки: завершение (переход в состояние «зомби») либо прекращение действия дескриптора (Handle)
– Объекты синхронизации – в соответствии с логикой конкретного вида объекта.
WaitForSingleObject(), WaitForMultipleObjects(), SignalObjectAndWait(),

WaitFor***Ex(), с возможностью указания callback-функций для обработки завершения операций.

Объект Mutex - системный ISO-объект, реализующий классический мьютекс. Имеет уникальное имя и дескриптор (Handle), может использоваться в рамках одного процесса или между потоками разных процессов.
Состояния:
– «signaled» – мьютекс «свободен»
– «not signaled» – мьютекс «занят/захвачен»
Поддерживает повторный захват одним потоком. Создание с помощью CreateMutex(), открытие по имени с OpenMutex(), отказ от объекта CloseHandle(), освобождение с ReleaseMutex(), и захват с функцией ожидания.

Объект Semaphore - системный ISO-объект, соответствует классическому семафору. Идентифицируется уникальным именем и дескриптором (Handle), может использоваться в разных процессах. Состояния: "signaled" (значение больше 0) и "not signaled" (значение равно 0). Создание через CreateSemaphore(), открытие по имени с OpenSemaphore(), отказ от объекта CloseHandle(), Безусловный инкремент счетчика семафора V(S) ReleaseSemaphore(), и блокирующий декремент с функцией ожидания.

Объект Event - системный ISO-объект, представляющий программное событие. Имеет уникальное имя и дескриптор (Handle), может использоваться в рамках одного процесса или между потоками разных процессов. Состояния: "signaled" (событие произошло и не обработано) и "not signaled" (событие не произошло или уже обработано). Уведомляет потоки, что произошло событие.

Типы событий:
С **автоматическим** сбросом, с **ручным** сбросом (manual reset).
Функции: CreateEvent(), SetEvent(), Явный сброс в "not signaled": ResetEvent()
Временная установка в "signaled" до срабатывания всех ожидающих функций: PulseEvent()

Объект Waitable Timer - системный ISO-объект, таймер с несколькими параметрами и несколькими путями использования. Идентифицируется уникальным именем и дескриптором (Handle), может использоваться в разных процессах. Уведомляет потоки о получении указанного времени.
Типы таймеров:
– **manual-reset** – сброс таймера путем новой установки величины задержки явным вызовом функцией SetWaitableTimer()
– **synchronization** – сброс таймера автоматически при завершении Wait-функции
– **periodic** manual reset, **periodic** synchronization – аналогично, но перевод таймера в состояние «signaled» повторяется периодически через заданные интервалы времени.
Функции: CreateWaitableTimer(), OpenWaitableTimer(), CloseHandle(), SetWaitableTimer(), CancelWaitableTimer().

Канальные IPC: каналы и «почтовые ящики»
Каналы — это объекты, которые работают аналогично файлам и обеспечивают межпроцессное взаимодействие.

Типы каналов:
Неименованный канал (pipe):
- Используется только между родственными процессами.
- Не может быть открыт сторонними процессами.

Именованный канал (FIFO):
- Полноценный объект файловой системы.
- Доступен всем процессам в системе.

Основное **отличие каналов от обычных файлов** – доступ только последовательный, причем чтение – разрушающее (данные удаляются после прочтения).

Обработка доступа:
Чтение:
- Непустой канал - чтение данных.
- Пустой канал — блокировка (ожидание).
- Пустой канал без писателей — ошибка (для pipe).

Запись:
- Запись данных или ожидание места.
- Запись без читателей — ошибка (для pipe).

Ограничения:
- Нет встроенных средств для предотвращения коллизий.
- Параллельная запись может привести к смешиванию данных.
- Параллельное чтение может давать невалидные фрагменты.

Возможные решения:
- Ограничение участников взаимодействия.
- Отказ от двунаправленного обмена.
- Использование дополнительных средств синхронизации.

Почтовый ящик (mailslot)
Однонаправленность: Данные передаются только в одном направлении, что упрощает управление.
Идентификация: Каждый ящик связан с единственным «читателем», что снижает риск потери целостности данных.

Двунаправленный обмен:
Для двунаправленного обмена используются два однонаправленных почтовых ящика. (Минимизация коллизий: только один процесс читает данные. Упрощение идентификации: четкая связь между ящиком и читателем.)

Канальные IPC в Windows

Неименованные каналы (pipe)
Идентификация: Используется только дескриптор (Handle), нет имени.
CreatePipe(), CloseHandle()
Особенности:
- Два отдельных дескриптора: чтения и записи.
- Существуют только между родственными процессами.

- Удаляются после отключения последнего пользователя, данные теряются.

Именованные каналы (FIFO)
Идентификация: Дескрипторы для открытого канала и глобальные имена в файловой системе: \\.\pipe\pipename.
CreateNamedPipe(), CloseHandle(), CreateFile() - подключение к существующему каналу
Особенности:

- Несимметричность: выделяются клиент и сервер.
- Возможность нескольких экземпляров для разных клиентов.
- Непрочитанные данные теряются после закрытия экземпляра.
- Дескрипторы могут быть одно- или двунаправленными.
- Два типа: «byte-type» и «message-type» (управляется параметром dwPipeMode). Возможности «канала сообщений» приближены к задачам взаимодействия «клиент- сервер» и «пакетным» сокетам.
- Дополнительные функции: неразрушающее чтение, обратная связь.

Почтовые ящики (Mailslot)
Имена: \\.\mailslot\slotname, \\computername\mailslot\slotname, и т.д.
CreateMailslot(), CloseHandle(), CreateFile() - подключение к существующему ящику
Особенности:

- Владельцем становится процесс, который создал ящик (доступ только для чтения).
- Может быть открыт удаленно через сеть.

Разделяемая память (Shared Memory) (В windows - отображение файла в память)

- Обеспечение: Совместный доступ к данным в выделенной памяти.
- Преимущества: Высокая производительность.
- Проблемы: Коллизии при параллельном доступе.
- Решение: Использование семафоров и мьютексов для синхронизации.

Очереди сообщений (Message Queue, MQ)

- Описание: Асинхронный механизм для передачи сообщений с буферизацией.
- Преимущества: Гарантия целостности сообщений.
- Примеры: Microsoft MQ, IBM MQ, Amazon SQS, Java Message Service.

Другие средства обмена данными в Windows

- Оконное сообщение: WM_COPYDATA
- Буфер обмена: Clipboard
- Глобальные данные: DLL
- Удаленный вызов процедур: RPC

Другие решения. Комплексные механизмы

Сокеты - механизм взаимодействия, близкий к каналам, используется в сетевом и локальном программировании.

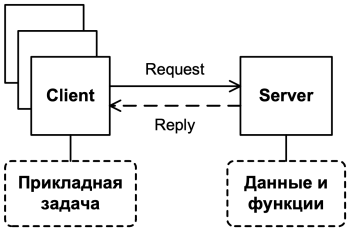
Монитор Хоара - интерфейс для работы с общими данными, обеспечивает синхронизацию и скрывает доступ к критическим ресурсам.

Рандеву - концепция взаимодействия между процессами, требует предварительной подготовки для обмена данными. Этапы подготовки процессов:
1) заявить о намерении взаимодействовать (назначить рандеву)
2) подтвердить согласие на взаимодействие
3) объявить точку взаимодействия
4) подтвердить точку взаимодействия

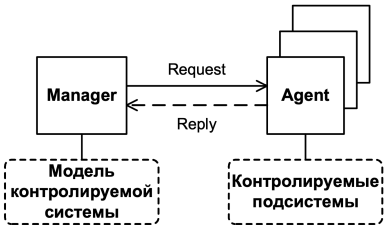
Симметричное рандеву (Хоар) - процессы равноправны, операторы «!» и «?» обеспечивают передачу и прием данных.

Асимметричное рандеву (Хансен) - участники имеют заранее распределенные роли «хозяин» (посылает запросы) и «слуга» (принимает запросы), обмен данными осуществляется через вызов функций.
Эффективная реализация асимметричного рандеву требует поддержки на аппаратном уровне.

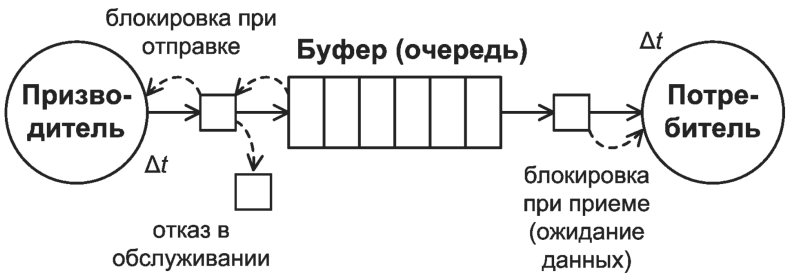
Развитие идеи асимметричного рандеву.
"**Клиент-сервер**":
Определение: Клиент обращается к серверу с запросом и получает ответ.
Характеристики: Предполагается, что серверов меньше, чем клиентов. Клиент может обращаться к нескольким серверам.
Пример: Клиент-серверные системы управления базами данных (СУБД).



"Агент-менеджер":
Определение: Менеджер отправляет запросы множеству агентов, собирает ответы и управляет системой через агентов.
Характеристики: Предполагается, что агентов больше, чем менеджеров. Один агент может работать на нескольких менеджерах.
Примеры: Управление сетевыми протоколами и служба SNMP с базой MIB.



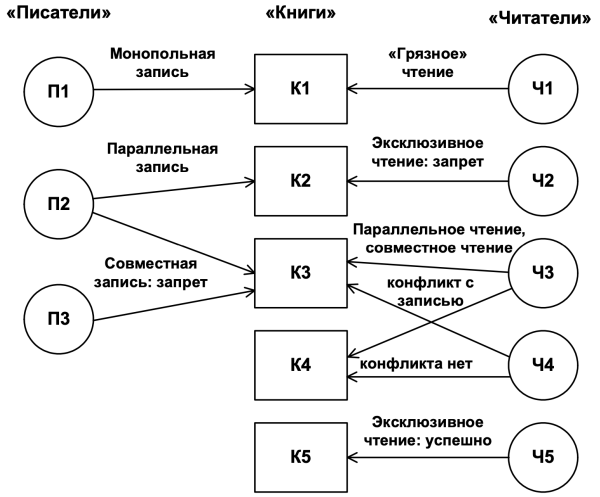
Модели ситуаций взаимодействия



Модель "**Производитель - потребитель**" описывает процесс взаимодействия между создателем данных (производителем) и пользователем этих данных (потребителем). Проблемы включают согласование скоростей, управление доступом к общему ресурсу (буферу) и эффективное управление процессом.

Буферизация сглаживает пиковые значения времени обработки, но не решает разницу в производительности между участниками, что может привести к блокировкам.

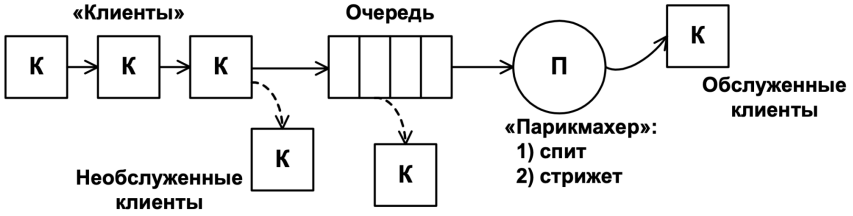
Для разрешения коллизий используют детерминированную передачу прав доступа, встречные сообщения-квитанции и семафоры/мьютексы для защиты критических секций.



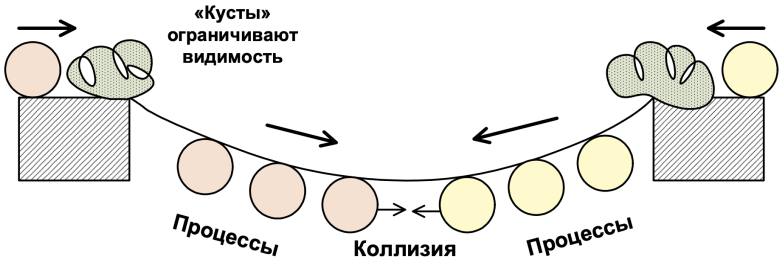
Модель "**Писатели и читатели**" управляет доступом к общим ресурсам, где процессы либо читают, либо пишут данные. Виды доступа включают эксклюзивную запись, эксклюзивное чтение, "грязное" чтение (параллельно с записью), совместное чтение и другие.

Для контроля доступа применяются семафоры или мьютексы, отражающие состояние каждого ресурса. Критическая секция требует захвата ресурса для соответствующего доступа.

Частая проблема - множественные "читатели", что может вызвать блокировки. Решение включает двойные семафоры, учет заявок на доступ и управление приоритетами, где заявка на запись имеет приоритет, но не блокирует существующих читателей.

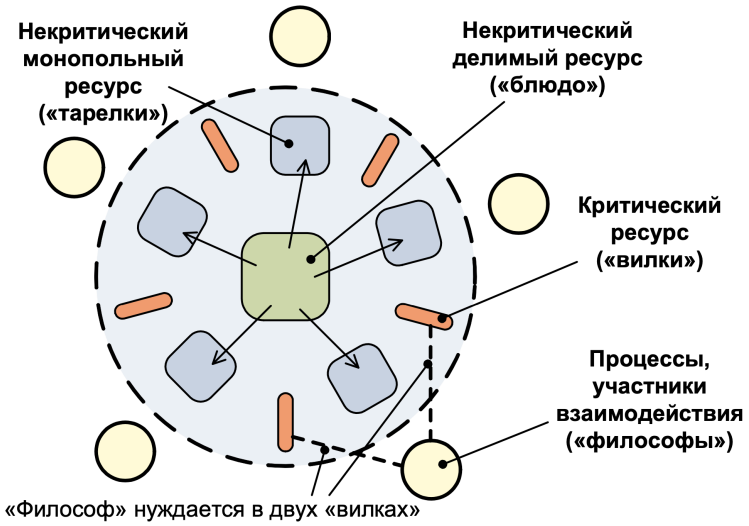


Модель "**Парикмахерская**" представляет систему обслуживания с одним парикмахером и очередью клиентов. Парикмахер может находиться в состоянии "**сна**" без клиентов или в состоянии "**работы**" при обслуживании клиента.
Основная цель - обеспечить оптимальную загрузку системы, чтобы парикмахер был почти всегда занят работой, но очередь клиентов была практически не заполнена, и клиенты не терялись. Важно поддерживать баланс между активностью парикмахера и уровнем заполненности очереди для эффективного обслуживания клиентов.



Модель "**Бабуины на канате**" представляет процессы как бабуины, двигающиеся только влево или вправо по канату без возможности изменить направление. Грузоподъемность канатного моста ограничена, и видимость около его концов ограничена.

Коллизии разрешаются путем "**сброса**" процессов с каната. Цель модели - обеспечить эффективное движение процессов с максимальной пропускной способностью и минимальными потерями. Применение модели включает конвейерную обработку, взаимодействие в распределенных системах и разработку коммуникационных протоколов.



Модель "**Обедающие философы**" описывает ситуацию, где философы сидят за круглым столом и думают или едят. Между каждыми двумя философами лежит вилка, необходимая для еды. Каждый философ в цикле выполняет следующие действия: размышляет, захватывает две ближайшие вилки, ест, освобождает вилки. Философы могут находиться в состояниях "еда", "размышления" и "голодание". Каждый философ имеет доступ только к двум ближайшим вилкам и не может брать вилки через стол или у соседа. **Цель модели** - обеспечить безаварийное и эффективное функционирование коллектива философов, предотвратить взаимную блокировку и обеспечить справедливый доступ к ресурсам.

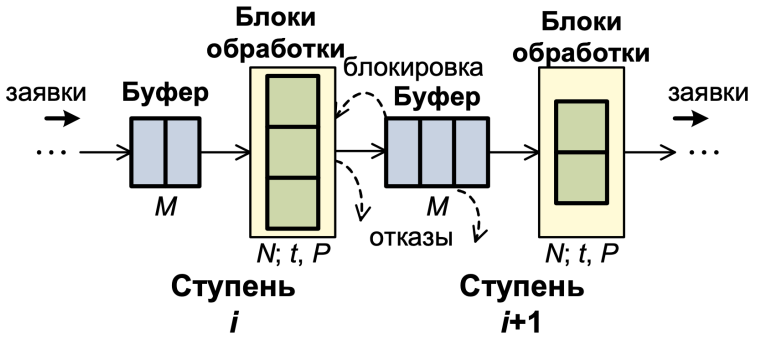
Проблема возникает, когда все философы одновременно берут левую вилку и ждут правую, что приводит к взаимной блокировке.
Основные проблемы:

- Тупик: Все философы ждут друг друга, никто не может поесть.
- Зависание: Система может бесконечно переключаться между состояниями, не выполняя полезной работы.
- Вечное голодание: Некоторые философы могут бесконечно долго ждать вилок.

Возможные решения:

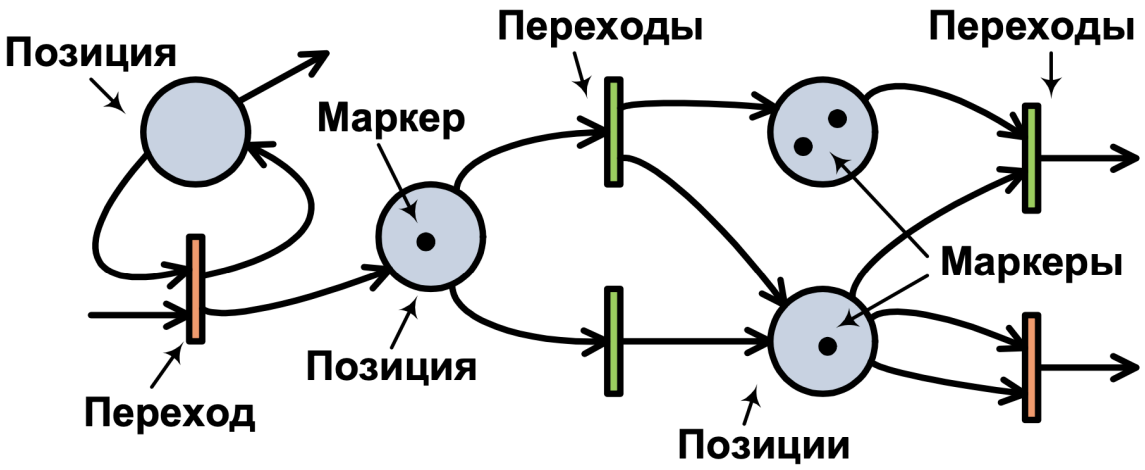
- Семафоры: Использование семафоров для синхронизации доступа к вилкам.
- Иерархия ресурсов: Введение порядка захвата вилок.
- Таймауты: Ограничение времени ожидания вилок.
- Случайность: Случайный выбор вилок и задержки.
- Маркеры: Передача разрешений на использование вилок по кругу.
- Атомарный захват: Одновременный захват обеих вилок.
- Официант: Централизованный контроль над распределением вилок.
- Монитор: Обеспечение атомарности операций над вилками.
- Слуга: Дополнительный процесс, управляющий философами.
- Избыточность ресурсов: Добавление вилок или удаление философов.

Системы массового обслуживания (СМО)



СМО представляют собой системы, которые обрабатывают поток входных запросов или заявок на выполнение определенных действий. Они состоят из последовательности ступеней с исполнительными узлами и буферами для заявок. Примеры таких систем включают в себя производственные конвейеры, процессоры, занятые проектами разработки ПО и другие.

Сети Петри



Сети Петри представляют параллельные и асинхронные процессы в системах. Сеть Петри представляет собой ориентированный двудольный граф с вершинами двух типов. Они состоят из позиций (состояний) и переходов (управляют изменениями). Маркеры передаются между позициями через переходы. Переходы срабатывают в соответствии с условиями наличия маркеров на входящих дугах.

Моделирование включает начальную разметку и шаги имитационного моделирования. Решаемые задачи включают достижимость состояний и "живость" сети. Сети Петри формализуются хорошо, используются модификации с различными характеристиками.

Физический канал - это реальный канал связи, который представляет собой физическую инфраструктуру (например, провода, оптоволокно, беспроводные средства связи), через который передаются данные между устройствами.

Виртуальный канал - это абстрактный канал передачи данных, который создается на основе физического канала. Виртуальный канал обладает своими свойствами и характеристиками, которые могут отличаться от физического канала. Виртуальный канал передачи данных имитирует файл или поток ввода-вывода для прикладных программ.

Коммутация – распределение имеющихся физических каналов для создания виртуальных.

Основные методы:

- **Коммутация каналов**: Соединение абонентов физическим каналом на время сеанса. Можно передавать поток данных или сообщения.
- **Коммутация сообщений**: Канал формируется заново для каждого блока данных. Размер сообщения большой и неизвестен заранее.
- **Коммутация пакетов**: Данные передаются множествами пакетов ограниченного размера, доставляемыми независимо. Фрагментация и сборка автоматически, прозрачно для абонентов.

Сети сегодня используют коммутацию пакетов как более надежный и экономичный метод. Arpanet (предшественник Internet) исследовала коммутацию пакетов для построения надежной сети передачи данных.