Лекция № 3. Управление модельным временем

Цель лекции

Сформировать у обучающихся теоретические знания о принципах и механизмах управления модельным временем в имитационном моделировании, изучить основные методы изменения модельного времени, особенности моделирования параллельных процессов, способы их синхронизации и взаимодействия, а также освоить основные понятия и принципы применения сетей Петри для описания и анализа сложных динамических систем.

План лекции

1. Понятие времени в имитационном моделировании и виды его представления.
2. Основные задачи и механизмы управления модельным временем.
3. Метод изменения модельного времени с постоянным шагом.
4. Метод изменения модельного времени по особым состояниям.
5. Сравнительный анализ методов управления модельным временем.
6. Моделирование параллельных процессов и их классификация.
7. Механизмы взаимодействия и синхронизации параллельных процессов.
8. Организация списков текущих и будущих событий.
9. Применение сетевых моделей для описания параллельных процессов.
10. Основные понятия, структура и функционирование сетей Петри.
11. Виды сетей Петри и их применение для моделирования бизнес-процессов.

Ожидаемые результаты обучения

После изучения лекции обучающиеся должны:

- знать основные виды представления времени в имитационном моделировании;
- понимать назначение механизмов управления модельным временем;
- различать моделирование с постоянным шагом и моделирование по особым состояниям;
- определять условия применения различных методов изменения модельного времени;
- знать основные виды параллельных процессов и способы организации их взаимодействия;
- объяснять назначение списков текущих, будущих и прерванных событий;
- понимать структуру и принципы функционирования сетей Петри;
- различать основные разновидности сетей Петри;
- применять полученные знания при разработке алгоритмов имитационного моделирования сложных систем.

1. Понятие времени в имитационном моделировании и виды его представления

Время является одним из важнейших факторов имитационного моделирования, поскольку большинство исследуемых систем характеризуется изменением своего состояния в процессе функционирования.

Имитационный эксперимент предполагает наблюдение за поведением системы в течение определенного промежутка времени. При этом временные характеристики могут непосредственно влиять на результаты исследования и эффективность моделируемой системы.

В практических задачах скорость протекания реальных процессов часто существенно отличается от скорости выполнения модельного эксперимента. Например, моделирование работы вычислительного центра за неделю может выполняться на компьютере значительно быстрее реального времени.

При разработке имитационной модели необходимо различать три основных вида времени.

Реальное время – время, в течение которого функционирует исследуемая система в действительности.

Модельное (системное) время – условное время, используемое для организации работы модели и отражения последовательности изменения состояний моделируемой системы.

Машинное время – фактическое время работы вычислительной техники, затрачиваемое на проведение имитационного эксперимента.
Эти три вида времени взаимосвязаны, однако не обязательно совпадают.
Например, работа производственной системы за несколько суток может быть воспроизведена с помощью компьютерной модели за несколько минут.
Таким образом, использование модельного времени позволяет исследовать длительные процессы в сокращенном временном масштабе, сохраняя необходимую последовательность событий.

2. Основные задачи и механизмы управления модельным временем

Управление модельным временем является важным элементом организации имитационного эксперимента.
С помощью механизмов модельного времени решаются следующие задачи:

- отображение переходов моделируемой системы из одного состояния в другое;
- синхронизация функционирования отдельных компонентов модели;
- изменение масштаба времени исследуемой системы;
- управление последовательностью выполнения модельного эксперимента;
- обеспечение квазипараллельной обработки событий и процессов.

Особое значение имеет организация квазипараллельного выполнения процессов.
Квазипараллельное моделирование – способ воспроизведения одновременного функционирования нескольких процессов посредством их последовательной обработки в имитационной модели.
В реальной системе отдельные компоненты могут функционировать одновременно. Однако при программной реализации модели обработка соответствующих событий может осуществляться последовательно.
Механизм управления модельным временем обеспечивает согласованность событий и правильную последовательность изменения состояний системы.
Выбор конкретного метода управления модельным временем зависит от назначения модели, сложности исследуемой системы, характера происходящих процессов и требований к точности получаемых результатов.
Основными подходами являются изменение времени с постоянным шагом и изменение времени по особым состояниям.

3. Метод изменения модельного времени с постоянным шагом

Одним из наиболее распространенных способов управления временем в имитационных моделях является метод постоянного шага.
Моделирование с постоянным шагом – метод, при котором модельное время изменяется через фиксированные интервалы, заранее установленные исследователем.
Текущее значение модельного времени определяется выражением:

$$t_{m,k+1} = t_{m,k} + \Delta t,$$

где:

- $t_{m,k}$ – текущее значение модельного времени;
- Δt – фиксированный шаг моделирования;
- k – номер шага моделирования.

При использовании данного метода состояние системы проверяется через одинаковые промежутки времени. Событие считается зарегистрированным в момент окончания соответствующего интервала.
Точность определения временных характеристик системы непосредственно зависит от величины выбранного шага.
Метод постоянного шага целесообразно использовать в следующих случаях:

- события возникают регулярно и достаточно равномерно распределяются во времени;
- количество событий велико, а интервалы между ними относительно малы;

- моменты возникновения событий невозможно заранее определить.

Основное преимущество метода заключается в относительной простоте программной реализации.

Однако при выборе слишком большого шага моделирования возникает риск пропуска важных изменений состояния системы или неточного определения моментов наступления событий.

В качестве примера рассмотрим моделирование движения самолета, пересекающего определенный воздушный рубеж.

Пусть самолет движется равномерно с постоянной скоростью V, а расстояние до рубежа составляет R.

Пройденный самолетом путь определяется зависимостью:

$$S(t) = Vt.$$

При моделировании положение самолета последовательно вычисляется через интервалы Δt. Событие пересечения рубежа фиксируется при выполнении условия:

$$S(t) \geq R.$$

Полученный в модели момент пересечения рубежа может отличаться от реального момента, поскольку проверка выполняется только в конце каждого шага.

Следовательно, выбор величины шага является важной задачей при построении имитационной модели.

4. Метод изменения модельного времени по особым состояниям

Другим способом управления модельным временем является метод изменения времени по особым состояниям.

Моделирование по особым состояниям – метод, при котором модельное время изменяется непосредственно до момента наступления ближайшего запланированного события.

В отличие от метода постоянного шага, здесь отсутствует необходимость проверять состояние системы через одинаковые промежутки времени.

Модельное время перемещается от одного значимого события к другому.

Для реализации данного метода используется специальный механизм планирования событий, называемый календарем событий.

Календарь событий содержит информацию о моментах возникновения запланированных событий и обеспечивает их обработку в хронологическом порядке.

Если известны интервалы между событиями, очередной момент определяется выражением:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i,$$

где:

- t_i – время предыдущего события;
- Δt_i – интервал между событиями;
- t_{i+1} – время следующего события.

Метод изменения времени по особым состояниям рекомендуется применять, если события распределены неравномерно, интервалы между ними велики или предъявляются повышенные требования к точности определения их последовательности.

Важным преимуществом данного метода является экономия машинного времени, поскольку вычисления не выполняются в промежутках, где отсутствуют значимые события.

Рассмотрим пример моделирования работы диспетчера, который вводит сообщения о движении самолета.

Пусть интервалы между поступлением сообщений являются случайными величинами, распределенными по заданному закону.

При каждом поступлении сообщения модельное время изменяется на соответствующий интервал, после чего производится обработка сообщения и планирование следующего события.

Таким образом, вычислительный процесс организуется в соответствии с фактической последовательностью событий, а не с заранее установленным временным шагом.

5. Сравнительный анализ методов управления модельным временем

Методы постоянного шага и особых состояний имеют различные характеристики и области применения.

Критерий	**Постоянный шаг**	**По особым состояниям**
Изменение времени	Через фиксированные интервалы	До ближайшего события
Последовательность обработки	По временным шагам	По времени наступления событий
Точность определения момента события	Зависит от размера шага	Определяется временем запланированного события
Вычислительные затраты	Зависят от количества шагов	Зависят от количества событий и сложности их обработки
Сложность реализации	Относительно невысокая	Требует календаря событий
Основная область применения	Регулярные процессы	Дискретные процессы с неравномерными событиями

Выбор метода управления модельным временем определяется особенностями моделируемой системы.

Для систем, в которых события происходят равномерно или с высокой частотой, целесообразно использовать метод постоянного шага.

Для дискретных систем с неравномерным распределением событий более эффективным может быть метод изменения модельного времени по особым состояниям.

При моделировании систем, содержащих компоненты с различными единицами измерения времени, необходимо предварительно привести их временные характеристики к единому масштабу.

6. Моделирование параллельных процессов и их классификация

Большинство сложных технических, производственных и информационных систем состоит из нескольких компонентов, функционирующих одновременно.

Параллельные процессы – процессы, выполнение которых происходит одновременно или с перекрытием временных интервалов.

В зависимости от характера взаимодействия выделяют асинхронные, синхронные, подчиненные и независимые параллельные процессы.

Асинхронный параллельный процесс – процесс, состояние которого не зависит от состояния другого параллельного процесса.

Примером является одновременное выполнение вычислений процессором и вывод информации на печать, если эти операции не требуют непосредственного согласования.

Синхронный параллельный процесс – процесс, состояние которого зависит от состояния взаимодействующих с ним процессов.

Например, работа торговой организации может зависеть от своевременной доставки товаров со склада.

Подчиненный параллельный процесс – процесс, который создается и управляется другим процессом более высокого уровня.

Независимый параллельный процесс – процесс, который не является подчиненным ни для одного из других процессов рассматриваемой системы.

Следует учитывать, что один процесс может быть синхронным по отношению к одному компоненту системы и асинхронным по отношению к другому.
При моделировании параллельных процессов необходимо учитывать их зависимости, порядок выполнения и использование общих ресурсов.

7. Механизмы взаимодействия и синхронизации параллельных процессов

В вычислительных системах параллельные процессы могут использовать общие ресурсы, что требует согласования их действий.
Для организации взаимодействия процессов применяются три основных механизма.
Взаимное исключение – механизм, при котором доступ к общему ресурсу временно предоставляется только одному процессу.
Такой подход позволяет предотвращать конфликты при одновременном обращении нескольких процессов к одним и тем же данным или устройствам.
Синхронизация посредством сигналов – механизм взаимодействия, при котором процессы обмениваются специальными сигналами, определяющими порядок выполнения операций.
Получение сигнала рассматривается как событие, вызывающее определенное действие со стороны процесса.
Обмен сообщениями – механизм взаимодействия, предполагающий передачу информации между процессами.
В отличие от простой передачи сигнала, обмен сообщениями позволяет передавать дополнительные данные, необходимые для согласования работы компонентов системы.
Перечисленные механизмы могут реализовываться на системном и прикладном уровнях.
На системном уровне взаимодействие процессов обеспечивается преимущественно операционной системой.
На прикладном уровне соответствующие механизмы реализуются разработчиком программного обеспечения.
В имитационном моделировании для представления параллельных процессов применяются специальные языки и программные системы моделирования, которые обеспечивают организацию квазипараллельного выполнения событий.

8. Организация списков текущих и будущих событий

При моделировании систем на основе транзактов важное значение имеет организация списков событий.
В зависимости от времени наступления и состояния обработки выделяют три основных вида списков.
Список текущих событий содержит события, время наступления которых меньше или равно текущему модельному времени. В него могут входить события, обработка которых была временно задержана.
Список будущих событий содержит события, запланированные на моменты времени, превышающие текущее значение модельного времени.
Список прерываний содержит события, связанные с возобновлением ранее прерванных процессов или обработки транзактов.
В процессе моделирования события последовательно перемещаются между соответствующими списками.
Вначале формируется список будущих событий. Затем выбирается событие с минимальным временем наступления.
Модельное время устанавливается равным времени выбранного события, после чего оно переносится в список текущих событий и обрабатывается.
Если несколько событий наступают одновременно, их обработка организуется с учетом установленных правил и приоритетов.
После обработки текущих событий выполняется переход к следующему событию из списка будущих событий.
Процедура повторяется до завершения заданного интервала моделирования.

Организация списков событий позволяет обеспечить правильную последовательность выполнения операций, согласовать параллельные процессы и упростить отладку имитационной модели.

9. Применение сетевых моделей для описания параллельных процессов

При разработке сложных имитационных моделей необходимо использовать специальные средства формального описания логики функционирования системы.

Одним из таких средств являются сетевые модели.

Сетевые модели позволяют представлять структуру системы в виде взаимосвязанных элементов и описывать последовательность выполнения операций.

Особое место среди сетевых методов занимают сети Петри, которые используются для моделирования дискретных динамических систем и параллельных процессов.

Сети Петри позволяют отображать последовательность событий, взаимодействие процессов, условия перехода системы из одного состояния в другое и использование общих ресурсов.

Основным преимуществом данного подхода является возможность формального представления сложных процессов, содержащих параллельные и взаимозависимые операции.

Сетевые модели применяются при исследовании вычислительных систем, производственных процессов, систем обслуживания и бизнес-процессов.

10. Основные понятия, структура и функционирование сетей Петри

Сеть Петри – ориентированный двудольный граф, состоящий из двух типов вершин: позиций и переходов, соединенных направленными дугами.

Позиции представляют условия или состояния системы, а переходы – события или действия, изменяющие эти состояния.

Основными элементами сети Петри являются:

- позиции – обозначают условия и состояния системы;
- переходы – соответствуют событиям или операциям;
- дуги – определяют связи между позициями и переходами;
- фишки (маркеры) – характеризуют текущее состояние сети.

Позиции обычно изображаются кружками, переходы – прямоугольниками или отрезками прямых, а фишки размещаются внутри позиций.

Дуги могут соединять только вершины разных типов: позицию с переходом либо переход с позицией.

Совокупность фишек, распределенных по позициям сети, называется разметкой.

Разметка определяет текущее состояние моделируемой системы.

Переход может сработать, если во всех необходимых входных позициях имеются фишки в количестве, достаточном для выполнения условий перехода.

При срабатывании перехода фишки удаляются из входных позиций и добавляются в выходные позиции согласно структуре и кратности дуг.

Таким образом, изменение разметки сети соответствует изменению состояния исследуемой системы.

Сети Петри позволяют исследовать последовательность выполнения операций, параллельность процессов, взаимные блокировки и другие особенности функционирования сложных систем.

11. Виды сетей Петри и их применение для моделирования бизнес-процессов

В зависимости от особенностей представления процессов выделяют различные виды сетей Петри.

Временные сети Петри учитывают продолжительность выполнения переходов.

Стохастические сети Петри используются для моделирования процессов, временные характеристики которых определяются случайными величинами.

Функциональные сети Петри предусматривают зависимость временных параметров от состояния сети или других характеристик.

Цветные сети Петри позволяют использовать фишки различных типов, что обеспечивает более подробное описание состояний и объектов моделируемой системы.
Ингибиторные сети Петри содержат специальные дуги, которые могут запрещать выполнение переходов при определенных условиях.
Иерархические сети Петри позволяют представлять сложную систему в виде взаимосвязанных сетей различных уровней.
Особую разновидность составляют WF-сети (Workflow Nets), предназначенные для моделирования потоков работ и бизнес-процессов.
WF-сеть характеризуется наличием одной начальной и одной конечной позиции. При этом каждый элемент сети должен находиться на пути от начальной позиции к конечной.
Такие сети используются для исследования корректности выполнения бизнес-процессов, выявления тупиковых ситуаций и недостатков синхронизации.
Например, процесс обработки обращения клиента может включать регистрацию обращения, проверку информации, принятие решения, выполнение необходимых действий и завершение обработки.
Отдельные операции могут выполняться параллельно, а некоторые действия начинаются только после выполнения определенных условий.
Сеть Петри позволяет представить такие зависимости в формальной форме и исследовать корректность организации процесса.
В исходном материале рассмотрен пример обработки жалобы, включающий регистрацию, отправку анкеты, оценку заявления, обработку жалобы, проверку результата и архивирование. Данный пример демонстрирует использование сетей Петри для описания параллельных работ, условных переходов и различных вариантов завершения бизнес-процесса.

Заключение

Управление модельным временем является важнейшим элементом имитационного моделирования, обеспечивающим воспроизведение последовательности событий и изменений состояния исследуемой системы.
Выбор метода изменения модельного времени зависит от характера моделируемых процессов, распределения событий во времени и требований к точности результатов.
Метод постоянного шага отличается относительной простотой реализации, тогда как метод изменения времени по особым состояниям позволяет эффективно моделировать дискретные системы с неравномерным распределением событий.
При исследовании сложных систем особое значение приобретает моделирование параллельных процессов, требующее организации механизмов синхронизации, взаимодействия и управления последовательностью событий.
Сети Петри представляют собой эффективный инструмент формального описания и анализа параллельных процессов, позволяющий исследовать функционирование динамических систем, выявлять возможные конфликты и оценивать корректность выполнения операций.
Изучение механизмов управления модельным временем и сетевых методов моделирования формирует теоретическую основу для разработки сложных имитационных моделей и проведения компьютерных экспериментов.

Контрольные вопросы

1. Какую роль играет время в имитационном моделировании?
2. Какие виды представления времени используются в имитационных моделях?
3. В чем заключаются различия между реальным, модельным и машинным временем?
4. Какие основные задачи решаются с помощью механизма управления модельным временем?
5. Что понимается под квазипараллельным моделированием?
6. В чем заключается сущность метода моделирования с постоянным шагом?
7. Как величина шага влияет на точность результатов моделирования?

8. В каких случаях целесообразно использовать моделирование с постоянным шагом?
9. Что понимается под моделированием по особым состояниям?
10. Для чего используется календарь событий?
11. Какие преимущества имеет метод изменения модельного времени по особым состояниям?
12. Чем отличаются методы постоянного шага и особых состояний?
13. Что понимается под параллельными процессами?
14. Чем отличаются синхронные и асинхронные параллельные процессы?
15. Что такое подчиненные и независимые параллельные процессы?
16. Какие механизмы взаимодействия параллельных процессов используются в вычислительных системах?
17. В чем заключается принцип взаимного исключения?
18. Как осуществляется синхронизация процессов посредством сигналов?
19. Для чего используются списки текущих и будущих событий?
20. Как организуется обработка событий при имитационном моделировании?
21. Что представляет собой сеть Петри?
22. Назовите основные элементы сети Петри.
23. Что понимается под разметкой сети Петри?
24. При каких условиях осуществляется срабатывание перехода?
25. Какие разновидности сетей Петри существуют?
26. В чем особенности временных и стохастических сетей Петри?
27. Для чего применяются цветные и иерархические сети Петри?
28. Что такое WF-сеть?
29. Какие требования предъявляются к структуре WF-сети?
30. Как сети Петри используются для моделирования и анализа бизнес-процессов?

Список литературы

1. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 342 с.
2. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. Discrete-Event System Simulation. – 5th ed. – Pearson, 2010.
3. Peterson J. L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. – 290 p.
4. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications // Proceedings of the IEEE. – 1989. – Vol. 77, No. 4. – P. 541–580. – DOI: 10.1109/5.24143.
5. van der Aalst W. M. P. The Application of Petri Nets to Workflow Management // Journal of Circuits, Systems and Computers. – 1998. – Vol. 8, No. 1. – P. 21–66. – DOI: 10.1142/S0218126698000043.