

5 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

5.1 Понятие имитационного моделирования

Имитационное моделирование есть процесс конструирования модели реальной системы и исследование этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторыми критериями или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы.

Имитационное моделирование представляет собой как бы своеобразный "теоретический эксперимент", когда на вход системы подаются различные значения входных переменных, а на выходе изучается поведение выходных переменных. В ряде исследований имитационное моделирование относится к экспериментальным методам исследования, однако с этим мнением нельзя согласиться, так как при имитационном моделировании исследователь оперирует с теоретической математической моделью.

По своей сущности имитационное моделирование приближается к численным методам анализа моделей, некоторые из которых мы будем рассматривать в дальнейшем, так как в основе его лежит многократное численное решение уравнений, входящих в модель. Имитационное моделирование осуществляется с помощью различных вычислительных машин.

5.2 Условия целесообразности использования имитационного моделирования

Имитационное моделирование целесообразно использовать при наличии любого из следующих условий:

1. Не существует законченной математической постановки данной задачи либо ещё не разработаны аналитические методы решения сформулированной математической модели.

2. Аналитические методы имеются, но математические процедуры столь сложны и трудоёмки, что имитационное моделирование даёт более простой способ решения задачи.

3. Аналитические решения существуют, но их реализация невозможна вследствие недостаточной математической подготовки имеющегося персонала. В этом случае следует сопоставить затраты на проектирование, испытания и работу на имитационной модели с затратами, связанными с приглашением специалистов со стороны.

4. Кроме оценки определённых параметров желательно осуществить на имитационной модели наблюдение за ходом процесса в течение определённого периода.

5. Имитационное моделирование может оказаться единственной возможностью вследствие трудностей постановки экспериментов и наблюдения явлений в реальных условиях. Соответствующим примером может служить изучение поведения космических кораблей в условиях межпланетных полётов.

6. Для долговременного действия систем или процессов может понадобиться сжатие временной шкалы. Имитационное моделирование даёт возможность полностью контролировать время изучаемого процесса, поскольку явление может быть замедлено или ускорено по желанию.

5.3 Разновидности имитационного моделирования

В зависимости от способа осуществления имитационного моделирования различают аналоговое и цифровое моделирование.

Аналоговое моделирование осуществляется с использованием аналоговых моделей.

Аналоговыми моделями являются модели, в которых свойство реально-

го объекта представляется некоторым другим свойством аналогичного по поведению объекта. Задача иногда решается путём замены одного свойства другим, после чего полученные результаты надо истолковывать применительно к исходным свойствам объекта. Примером АВМ может служить логарифмическая линейка, в которой количественные характеристики некоторого объекта представлены отрезками шкалы в логарифмическом масштабе.

Чаще всего при аналоговом моделировании количественные характеристики заменяются величинами электрических напряжений.

Цифровое моделирование осуществляется на цифровых ЭВМ. Здесь количественные характеристики выступают в их конкретной цифровой форме.

5.4 Аналоговое моделирование

Аналоговое моделирование осуществляется путем исследования поведения аналоговой модели на аналоговой вычислительной машине (АВМ). Имеется целый ряд различных моделей аналоговых вычислительных машин, таких, как "Электрон", ЭМУ-10, МЭ-14, МН-10, МН-7 и др. В инженерных исследованиях чаще всего используются последние две.

АВМ имеет наборное поле, на котором находится ряд операционных блоков (сумматоров, интеграторов, умножения и деления, универсальных функциональных преобразователей и др.); блоки имеют входы и выходы. Для осуществления моделирования блоки соединяют друг с другом проводниками в соответствии с аналоговой моделью; на вход подаётся входной сигнал, а на выходе с помощью вольтметра (или осциллографа) изучаются выходные переменные. Рассмотрим функции некоторых блоков.

Сумматор (рисунок 5.1) выполняет суммирование нескольких сигналов в соответствии с зависимостью

$$Y = -\beta_1 X_1 - \beta_2 X_2 - \beta_3 X_3,$$

где X_1, X_2, X_3 – входные переменные; Y – выходная переменная.

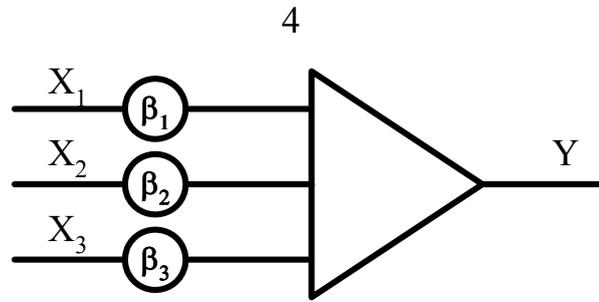


Рисунок 5.1 – Условное обозначение блока-сумматора

Если сумматор имеет один вход с $\beta=1$, он называется инвертор (рисунок 5.2). Инвертор используется для смены знака переменной в соответствии с выражением

$$Y = -X.$$

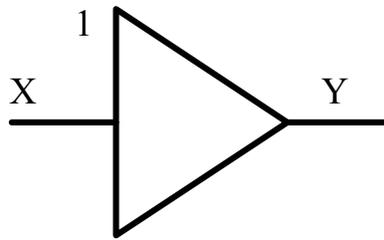


Рисунок 5.2 – Условное обозначение блока-инвертора

Интегратор (рисунок 5.3) преобразует вход в выход в соответствии с зависимостью

$$Y = -m \int_0^t X dt + X_0,$$

где X_0 – начальное условие.

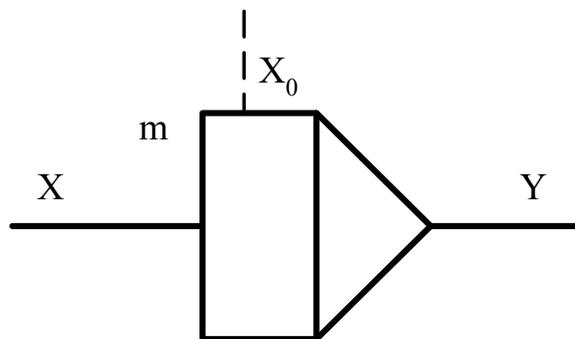


Рисунок 5.3 – Условное обозначение блока-интегратора

В качестве примера аналоговой модели рассмотрим случай собственных

колебаний упругой системы с трением, которые могут быть описаны дифференциальным уравнением вида

$$\ddot{x} + A\dot{x} + Bx = 0.$$

Преобразуя, получим

$$\ddot{x} = -A\dot{x} - Bx.$$

По этому выражению строим аналоговую модель (рисунок 5.4).

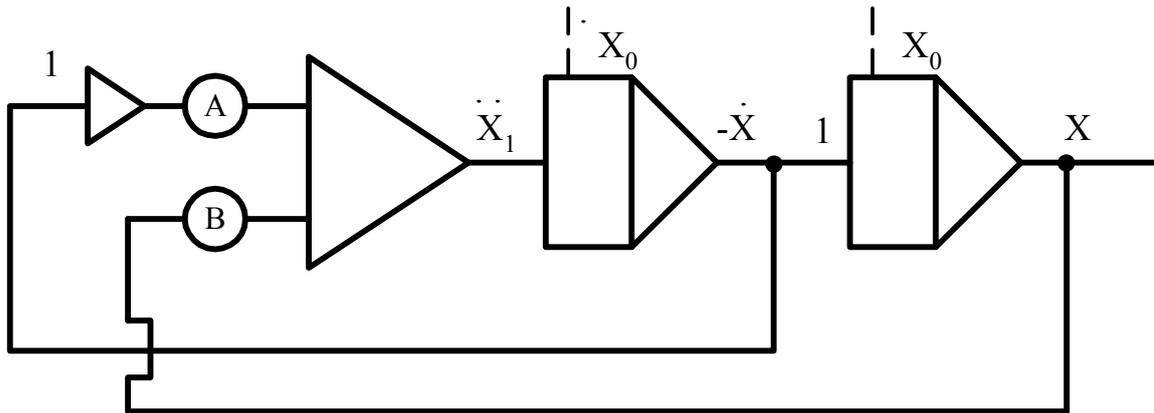


Рисунок 5.4 – Пример аналоговой модели

Задавая различные значения A и B, можно изучить поведение системы.

5.5 Цифровое имитационное моделирование

В настоящее время в связи с появлением мощных и быстродействующих цифровых ЭВМ цифровое имитационное моделирование превратилось в один из наиболее распространённых методов теоретического исследования.

Особенно успешно они применяются при исследовании систем, имеющих сложное логическое взаимодействие элементов. Примером подобных систем могут служить разнообразные автоматизированные системы управления, экономические системы, автоматические линии, гибкие производственные системы и т. д.

В цифровых имитационных моделях часто используются рекуррентные соотношения (в различного типа шаговых задачах). Эти модели могут быть как детерминированными, так и стохастическими. При этом стохастические модели

могут иметь как внутреннюю стохастичность, так и внешнюю стохастичность. Последние являются, по сути дела, детерминированными моделями, на вход которых подаются случайные величины для изучения случайного поведения выходных переменных. Этот метод получил название метода Монте-Карло.

В различного рода имитационных моделях находят также применение элементы многих других математических теорий, таких, как:

- теория массового обслуживания;
- теория очередей;
- исследование операций;
- теория запасов;
- теория надёжности;
- теория игр;
- теория графов (сетевое планирование);
- численные методы высшего анализа;
- теория поиска экстремумов и т.д.

Для подобного моделирования особенно характерен системный подход. Однако, прежде чем разработать имитационную модель, необходимо разработать системную модель.

Для решения задач цифрового имитационного моделирования создаются специальные алгоритмы и программы для ЭВМ. Программы могут создаваться на различных языках программирования. Для упрощения составления программ решения задач имитационного моделирования разработан также ряд специальных языков, наиболее употребительным из которых является язык GPSS (General Purpose Simulating System) (США), имеющий специальные операторы. Рассмотрению особенностей использования GPSS для моделирования станков и станочных систем посвящены последующие разделы.

5.6 Имитационное моделирование транспортной системы с помощью алгоритмического языка высокого уровня

В качестве примера имитационного моделирования систем рассмотрим моделирование работы автоматизированного станочного комплекса (гибкой производственной системы – ГПС). Причем для упрощения задачи подробно остановимся на модели транспортно-складских операций, выполняемых в ГПС. Для осуществления этих операций в ГПС имеется так называемая автоматизированная транспортно-складская система (АТСС).

Применение АТСС, расположенной параллельно линии металлообрабатывающих станков и другого технологического оборудования, позволяет решать такие задачи, как хранение межоперационных заделов, межоперационная передача деталей, хранение и транспортирование от стеллажей к рабочим местам и обратно элементов технологической оснастки.

В качестве характерного примера на рисунке 5.5 схематически представлен общий вид ГПС, используемой при обработке корпусных деталей. Система состоит из двухстороннего склада, в позициях (ячейках) 12 которого на специальных поддонах хранятся объекты складирования. Каждая позиция склада характеризуется её адресом $A(I,J)$, который определяется целочисленными координатами данной ячейки по горизонтали (I) и по вертикали (J).

Склад обслуживается краном-оператором 10, который может перемещаться горизонтально вдоль склада, вертикально вверх или вниз и кроме того, по вертикали и по горизонтали одновременно. В любой из занимаемых позиций кран с помощью выдвигающегося внутрь ячейки рабочего органа выполняет операцию "взять" или "положить".

Вдоль склада располагаются станки 1, 2, 3, 4 и камеры для очистки деталей от стружки 9,11,13, связанные со складом специальными позициями приёма-выдачи 8. Заготовки поступают в склад через загрузочные позиции 1-3 с помощью поворотного крана-балки 14 после предварительного закрепления их вручную на рабочем месте 16 на специальных приспособлениях-спутниках. Ра-

бочее место 15 предназначено для разметки заготовок. Стенд вибростарения 5 связан со складом с помощью крана-балки 6 позицией приёма-выдачи.

Объекты складирования располагаются на складе в определённом порядке: вновь поступившие заготовки – в зоне I, детали после обработки на станке 1 – в зоне II, после обработки на станке 2 – в зоне III, после обработки на станке 3 – в зоне IV, а после обработки на станке 4 и окончательно обработанные детали – в зоне V. Каждую из этих зон, а также любую другую зону склада, состоящую из группы ячеек, можно задавать координатами её границ : левой I_l , правой I_p , нижней J_n и верхней J_v .

Построим имитационную модель работы АТСС, позволяющую определить продолжительность транспортно-складских операций. Будем рассматривать систему, состоящую из двух подсистем: крана-оператора и склада (подсистемы станков данной задачи не рассматриваются).

Каждой из задач, выполнение которых обеспечивает АТСС, соответствует определённый тип транспортно-складской операции. Каждый тип транспортно-складских операций характеризуется числом ходов N_x , совершаемых краном-оператором, и числом последовательно занимаемых им в ходе обслуживания позиций N_p . Причём каждая из последовательно обслуживаемых позиций при выполнении операции данного типа располагается в определённой зоне склада, заданной координатами её границ.

Анализ показывает, что по числу ходов N_x и позиций N_p все транспортно-складские операции можно разделить на три типа:

1) одноходовая операция, при выполнении которой кран-оператор на произвольной исходной позиции с адресом A_i перемещается по адресу A_1 и выполняет операцию "взять" или "положить" (рисунок 5.6, а);

2) двухходовая операция, при выполнении которой кран-оператор из произвольной позиции с адресом A_i перемещается по адресу A_1 , выполняет операцию "взять", а затем следует по адресу A_2 и выполняет операцию "положить" (рисунок 5.6, б);

3) четырёхходовая операция, при выполнении которой кран-оператор из

произвольной исходной позиции с адресом A_i движется по адресу A_1 , выполняет операцию "взять", перемещается по адресу A_2 , где выполняет операцию "положить", а затем перемещается по адресу A_3 , выполняет операцию "взять" и возвращается в позицию с адресом A_1 , где выполняет операцию "положить" (рисунок 5.6, в).

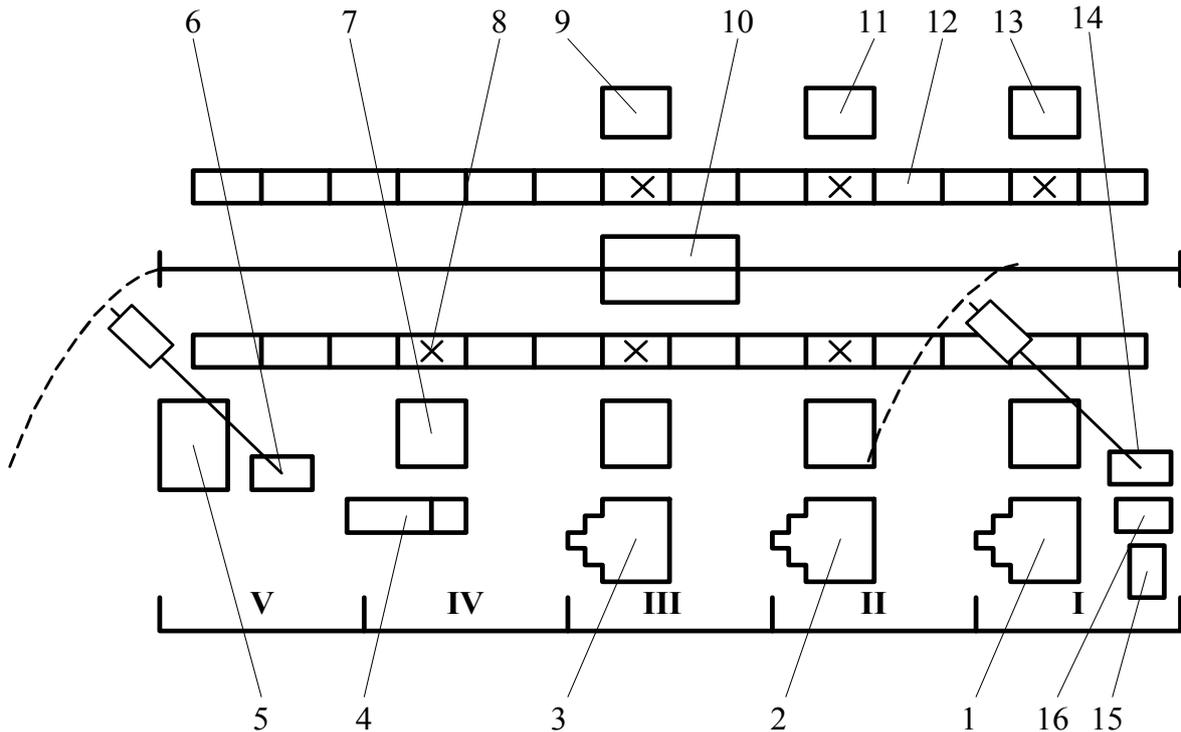


Рисунок 5.5 – Примерный вариант планировки ГПС:

1,2,3,4 – металлообрабатывающие станки; 5 – стенд вибростарения; 6,14 – кран-балка; 7 – поворотные столы станков; 8 – позиции приёма-выдачи; 9,11,13 – камеры для очистки деталей от стружки; 10 – кран-оператор; 12 – позиции (ячейки) склада; 15 – рабочее место для разметки заготовок; 16 – рабочее место для установки деталей на приспособления-спутники

Исходной позицией для всякой транспортно-складской операции является последняя позиция, обслуженная краном-оператором при выполнении предыдущей операции.

Уже на стадии проектирования описываемого автоматизированного склада возникает необходимость расчёта целого ряда его параметров, в том

числе средней продолжительности транспортно-складской операции данного типа Т. Для расчётов целесообразно воспользоваться математической моделью склада, построенной на основе теории массового обслуживания. Действительно, склад с краном-оператором можно рассматривать как однолинейную систему массового обслуживания с произвольным распределением длительности обслуживания, т.е. продолжительности одной транспортно-складской операции.

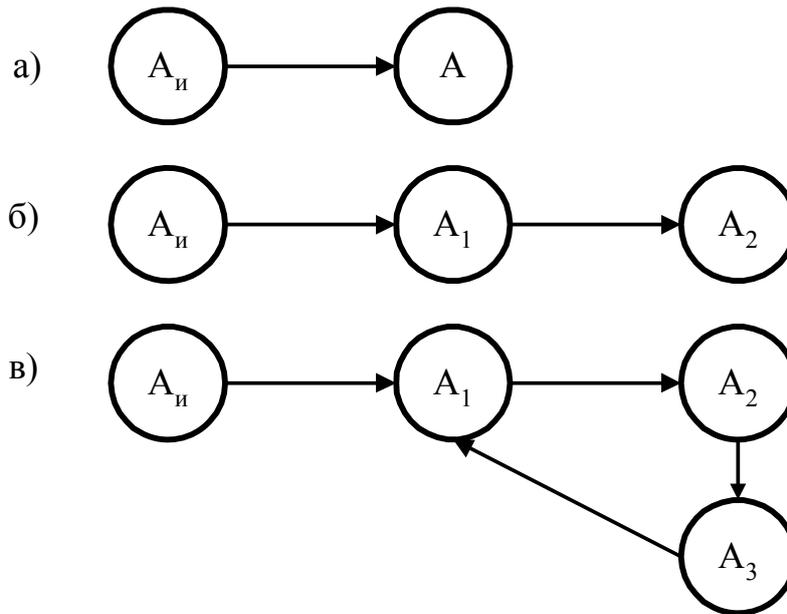


Рис. 5.6. Графы типов транспортно-складских операций:

а – одноходовая операция ($N_x=1$, $N_{п}=2$); б – двухходовая операция ($N_x=2$, $N_{п}=3$); в – четырёхходовая операция ($N_x=4$, $N_{п}=4$)

Длительность каждой транспортно-складской операции зависит от множества факторов и обстоятельств, возникающих в ходе функционирования АТСС. На стадии проектирования склада можно лишь сказать, что при выполнении данной транспортно-складской операции будет обслужена любая из позиций в пределах зоны, заданной её границами, но установить точно адрес этой позиции невозможно. Поэтому можно считать равновероятным факт обслуживания любой из позиций в пределах заданной зоны.

В такой ситуации выгодно воспользоваться методом Монте-Карло и координаты позиций определять с помощью псевдослучайных равномерно распределённых чисел, выработанных по специальной подпрограмме ЭВМ. Фор-

мулы для определения целочисленных координат обслуживаемой позиции

$$I = [(I_{\text{П}} - I_{\text{Л}} + 1) \cdot E] + I_{\text{Л}}; J = [(J_{\text{В}} - J_{\text{Н}} + 1) \cdot E] + J_{\text{Н}}, \quad (1)$$

где E – равномерно распределённая случайная величина в интервале от 0 до 1; [...] – целая часть выражения.

Установив таким образом адреса обслуживаемых позиций в каждой из зон, можно смоделировать ход выполнения транспортно-складской операции и определить её продолжительность T . Усредняя результаты моделирования по большому числу реализаций с равными адресами обслуживаемых позиций в пределах заданных зон, можно вычислить среднюю продолжительность операции данного типа по формуле

$$\bar{T} = \frac{\sum_{n=1}^N T_n}{N},$$

где N – число реализаций; n – номер очередной реализации; T – продолжительность операции по данной реализации.

Кроме того, можно определить дисперсию длительности обслуживания D_T по формуле

$$D_T = \frac{\sum_{n=1}^N T_n^2}{N} - \bar{T}^2.$$

Отклонение величин \bar{T} и D_T от их теоретического значения определяется числом реализаций, по которому производилось усреднение.

Транспортно-складская операция любого типа состоит из элементарных операций, число которых равно числу ходов крана-оператора N_x . Элементарной будем называть такую транспортно-складскую операцию, при выполнении которой кран-оператор совершает однократное перемещение (ход) из одной позиции в другую и выполняет в последней операцию "взять" или "положить". Продолжительность элементарной операции T' определяется по формуле

$$T' = T'' + T_{\text{в.п.}},$$

где T'' – время хода, т.е. время, затраченное краном-оператором на перемещение между позициями; $T_{в.п.}$ – продолжительность операций "взять" или "положить", т.е. время загрузки или разгрузки крана-оператора.

Величина $T_{в.п.}$ постоянна и определяется динамическими характеристиками рабочего органа крана-оператора, T'' – величина переменная, определяемая расстоянием между двумя последовательно обслуживаемыми позициями склада.

Учитывая, что кран-оператор может одновременно совершать независимые вертикальные и горизонтальные перемещения, расстояние между каждой парой последовательно обслуживаемых позиций будем задавать одновременно расстоянием по горизонтали $S_{г}$ и $S_{в}$ вертикали

$$S_{г} = h_{г} \Delta I; \quad S_{в} = h_{в} \Delta J, \quad (2)$$

где $h_{г}$ и $h_{в}$ – расстояние между двумя соседними позициями склада (шаг склада) по горизонтали и вертикали; ΔI и ΔJ – изменение целочисленных координат положения крана-оператора в ходе выполнения элементарной транспортно-складской операции:

$$\Delta I = |\dot{I}_{н} - \dot{I}_{к}|; \quad \Delta J = |\dot{J}_{н} - \dot{J}_{к}|,$$

где $\dot{I}_{н}$, $\dot{I}_{к}$ и $\dot{J}_{н}$, $\dot{J}_{к}$ – координаты начального и конечного положений крана-оператора при выполнении элементарной операции.

Перемещения, совершаемые краном-оператором в горизонтальном и вертикальном направлениях, взаимонезависимы, поэтому времена движения крана-оператора по горизонтали $T''_{г}$ и вертикали $T''_{в}$ не равны друг другу и общее время хода T'' определяется наибольшим из них:

$$T'' = \max(T''_{г}, T''_{в}).$$

Для определения величин $T''_{г}$ и $T''_{в}$ необходимо задаваться моделью движения крана-оператора в каждом из направлений. Скорость движения крана-оператора по вертикали $V_{в}$ невелика, и поэтому при построении математической модели можно считать, что кран-оператор в данном направлении дви-

жется без разгона и торможения. Тогда время движения по вертикали

$$T_B'' = \frac{S_B}{V_B}.$$

Маршевая скорость движения крана-оператора V_r в несколько раз больше, чем величина скорости V_B , поэтому, осуществляя построение математической модели, необходимо учитывать, что при движении в этом направлении происходит разгон с ускорением a_p , торможение с ускорением a_T и движение перед выходом в заданную координату на «ползучей» скорости V_n (рисунок 5.7, а).

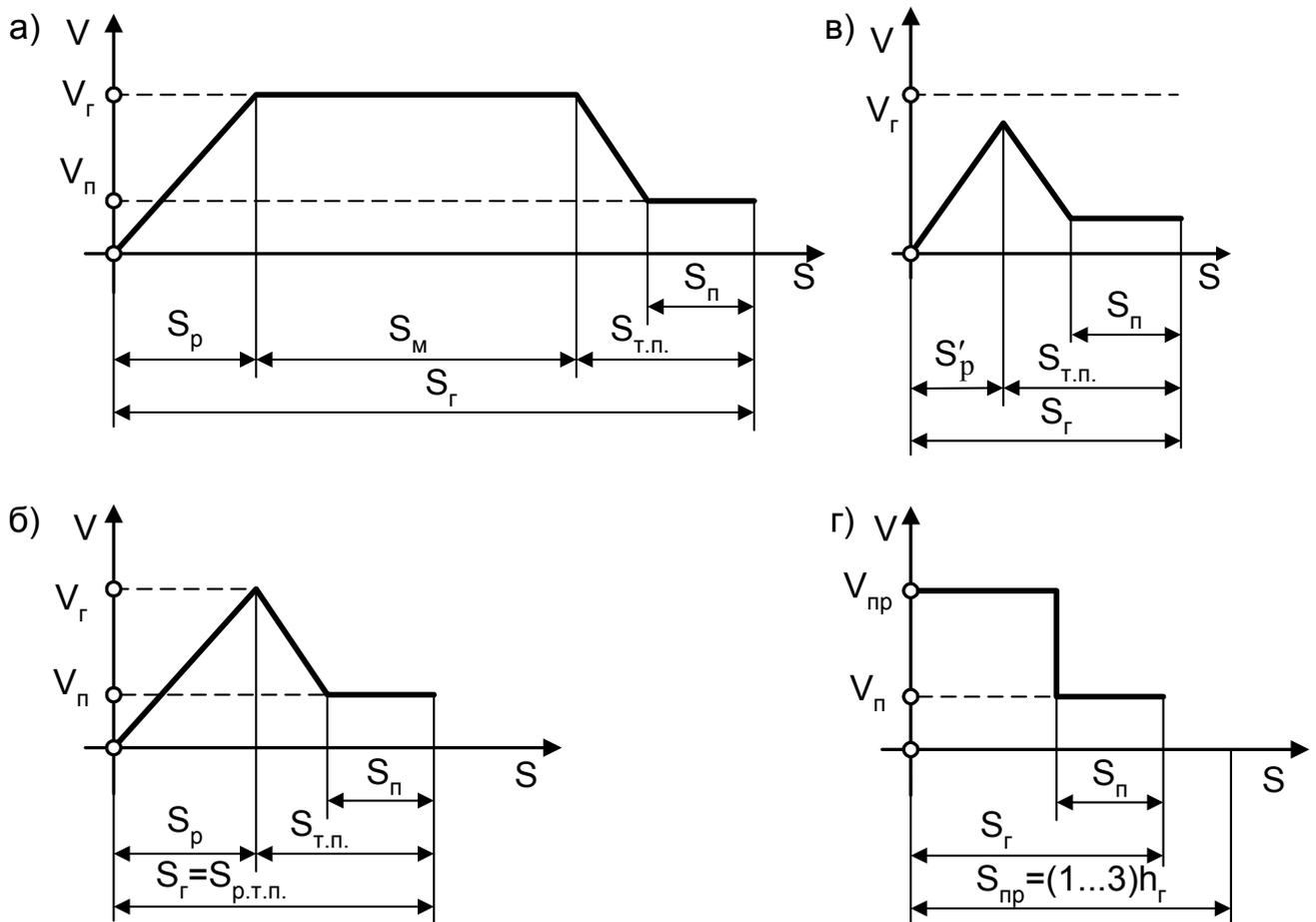


Рисунок 5.7 – Графики зависимости скорости движения крана-оператора от величины пройденного пути:

$$S_r > S_{p.т.п.}; S_r = S_{p.т.п.}; S_{np} < S_r < S_{p.т.п.}; S_r < S_{np}$$

Длина пути разгона SP определяется величиной маршевой скорости V_B

и ускорения разгона a_p

$$S_p = \frac{V_{\Gamma}^2}{2a_p}$$

Торможение начинается на заданном расстоянии $S_{т.п.}$ от конечной позиции хода, а переключение на движение с "ползучей" скоростью происходит на расстоянии S_p от конечной позиции.

Горизонтальное перемещение хода S_{Γ} складывается из двух частей:

$$S_{\Gamma} = S_{p.т.п.} + S_M,$$

где $S_{p.т.п.}$ – путь разгона, торможения и движения на «ползучей» скорости;

$$S_{p.т.п.} = \frac{V_{\Gamma}^2}{2a_p} + S_{т.п.};$$

S_M – путь движения на маршевой скорости.

Соответственно и время хода по горизонтали складывается из двух величин:

$$T_{\Gamma}'' = T_{p.т.п.} + T_M, \quad (3)$$

где $T_{p.т.п.}$ – время разгона, торможения и движения на "ползучей" скорости,

$$T_{p.т.п.} = \frac{V_{\Gamma}}{a_p} + \frac{V_{\Gamma} - V_{\Pi}}{a_T} + \frac{S_{\Pi}}{V_{\Pi}};$$

где T_M – время движения на маршевой скорости.

$$T_M = \frac{S_{\Gamma} - S_{p.т.п.}}{V_{\Gamma}}$$

В случае, когда $S_{\Gamma} = S_{p.т.п.}$ (рисунок 5.7, б), происходит разгон крана оператора до маршевой скорости и сразу же начинается процесс торможения.

Время хода по горизонтали T_{Γ}'' в этом случае

$$T_{\Gamma}'' = T_{p.т.п.} \quad (4)$$

Если $S_{\Gamma} < S_{пр}$, где $S_{пр}$ – некоторая специально установленная для дан-

ного склада величина (обычно $S_{пр} = (1 \div 3)$), то движение происходит не на маршевой $V_{г}$, а на промежуточной, меньшей по величине, скорости $V_{пр}$ (рисунок 4.3, г). Причем в данном случае не принимается в расчет время разгона и торможения крана-оператора. Время горизонтального хода $T_{г}''$ определяется по формуле

$$T_{г}'' = \frac{S_{г} - S_{п}}{V_{пр.}} + \frac{S_{п}}{V_{п}}. \quad (5)$$

При $S_{пр} < S_{г} < S_{р.т.п.}$ кран-оператор не успевает разогнаться до маршевой скорости и начинается процесс торможения (рисунок 5.7, в).

В этом случае величина определяется по формуле

$$T_{г}'' = \frac{\sqrt{2a_{р}(S_{г} - S_{р.т.п.})}}{a_{р}} - \frac{\sqrt{2a_{т}(S_{г} - S_{р.т.п.})} - V_{г}}{a_{т}} + \frac{S_{г}}{V_{п}}. \quad (6)$$

Построенная имитационная модель АТСС достаточно универсальна, ее можно использовать для расчета склада любой длины и этажности, с любыми характеристиками его элементов. Модель учитывает различные варианты движения крана-оператора в зависимости от длины хода. В случае необходимости число вариантов движения может быть увеличено, что обеспечивается гибкостью модели.

Таким образом, можно построить имитационную модель для любых других типов транспортно-складских операций в ГПС с различным количеством совершаемых ходов NX и последовательностью перемещения крана-оператора между обслуживаемыми им ячейками склада.

Описанная выше модель построена с учетом возможности реализации ее на ЭВМ. Программа для расчета составлена на универсальном алгоритмическом языке программирования. При реализации модели на ЭВМ используется стандартная подпрограмма получения случайных чисел для проведения расчетов по формулам (1-3). Быстродействие ЭВМ позволяет задаваться значительным числом реализаций, что обеспечивает требуемую точность расчета.

Программа составлена с учетом трех описанных типов транспортно-складских операций. Исходными данными для расчета являются характеристики крана-оператора и склада (h_g , h_v , V_g , V_v , V_p , $V_{пр.}$, a_p , a_t , $St.p.$, $S_{пр.}$), а также характеристики каждой из исследуемых операций (число ходов NX , число обслуживаемых позиций N_p и координаты границ обслуживаемых зон I_l , I_g , J_m , J_v).

Укрупненный алгоритм расчета на ЭВМ показан на блок-схеме (рисунок 5.8).

В разработанную модель можно внести элементы теории надежности в виде так называемого "потока отказов" оборудования, т.е. запрограммировать возникновение отказа оборудования в некоторые случайные моменты времени. Дальнейшее развитие модели может осуществляться также путем введения подсистем обслуживаемых станков, для которых характерен целый ряд различных состояний.

Метод имитационного моделирования на ЭВМ позволил не только получить важнейшие сведения о функционировании будущего комплекса оборудования, но и выявить недостатки проекта, указать пути их устранения.

Использование в процессе создания сложных станочных комплексов метода имитационного моделирования поднимает процесс проектирования на более высокий уровень.

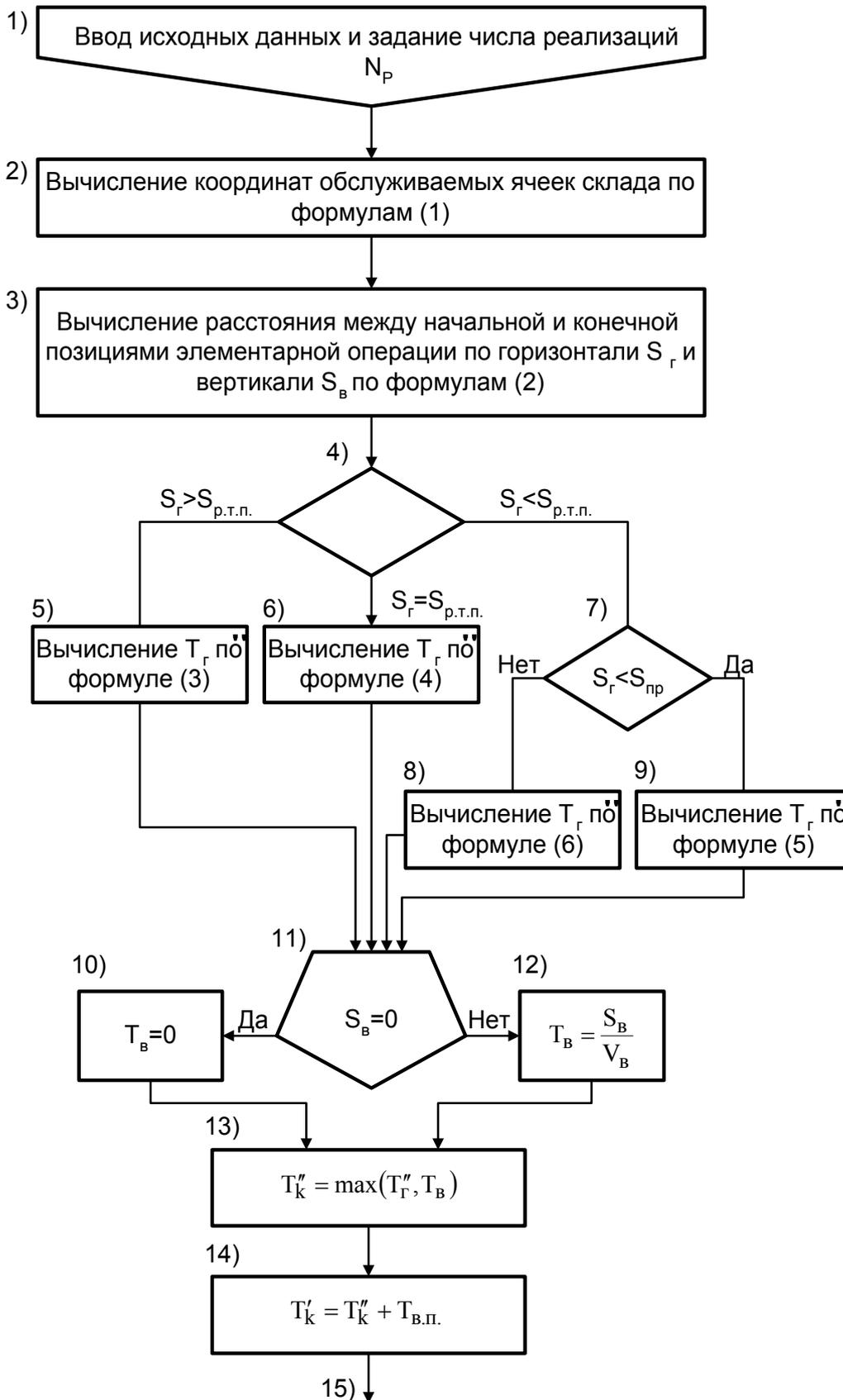
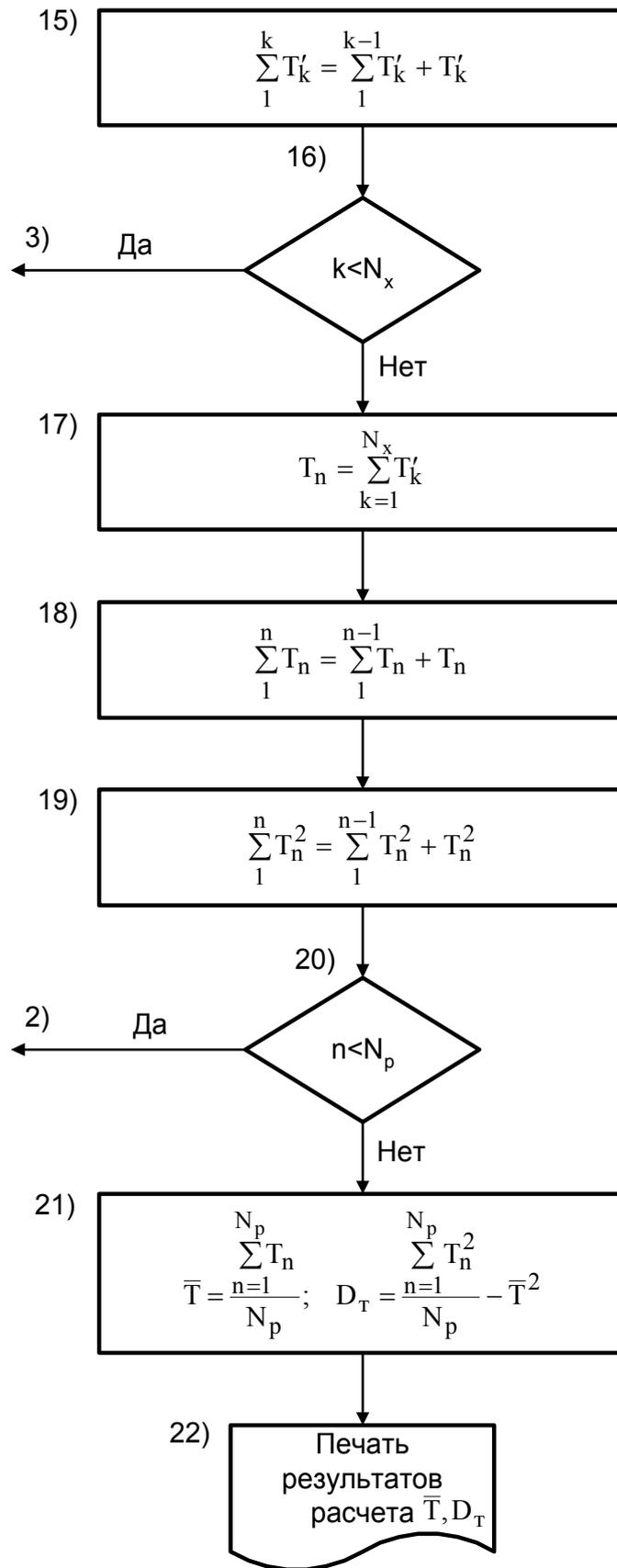


Рисунок 5.8 – Блок-схема алгоритма программы имитационного моделирования на ЭВМ

18



Окончание рисунка 5.8

5.7 Контрольные вопросы

1. Что такое имитационное моделирование?
2. Какие бывают виды имитационного моделирования?
3. С помощью какого оборудования осуществляется цифровое имитационное моделирование?
4. Элементы каких теорий находят применение в имитационном моделировании?
5. Какой язык имитационного моделирования является одним из наиболее употребительных?