

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ РЕГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЦЕНКЕ РИТМИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Товкач П.А., Николаев А.Б.

Введение

В настоящее время методы управления производственными процессами, основанные на интерактивных имитационных моделях, приобретают все большее распространение при организации работы предприятий. Все это требует необходимости внедрения новых информационных технологий в сферу управления их деятельностью, разработки и использования автоматизированных систем управления различного класса и назначения [1 - 6].

Потребности исследования сложных систем и разработки методов их моделирования приводят к рассмотрению в рамках единого процесса моделирования следующих этапов: построение модели, организация имитационного эксперимента, формирование процедур принятия решений. За последнее время разработано достаточно много систем имитационного моделирования, которые за счет своей проблемной ориентации предоставляют пользователю набор удобных средств, что упрощает процесс построения моделей. Среди них можно выделить GPSS, SIMULA, SIMULINK, НЕДИС, СЛЭНГ и другие. Однако следует отметить, что недостаточное внимание уделено разработке оптимизационных алгоритмов, учитывающих специфику проведения имитационного эксперимента.

Принципы проектирования имитационной модели

Существующие методы исследования распадаются на две основные группы - аналитические и имитационные. Методы аналитического исследования сводятся к получению достаточно компактных аналитических выражений, с помощью которых можно изучать поведение всей системы или некоторых узлов в виде некоторых функционалов. Существенным недостатком этих методов является то, что они применяются только для относительно простых структур. Наиболее точные результаты позволяет получить метод, основанный на физическом моделировании процессов. Недостатком этого метода, не позволяющим найти широкое применение, является высокая стоимость макета системы. Метод имитационного моделирования в значительной степени устраняет эти недостатки [2].

Так, общее определение имитационной модели дается в следующем виде: пусть M_1 и M_2 - некоторые модели, M_1' - модель, полученная из модели M_1 в результате применения гомоморфизма Γ_1 и описывающая функционирование модели M_1 ; M_2' - модель, полученная из модели M_2 в результате применения гомоморфизма Γ_2 и описывающая функционирование модели M_2 . Если M_1' и M_2' изоморфны, то считается,

что M_1 и M_2 суть взаимно имитационные модели в отношении описания процесса функционирования объекта управления.

Имитационный метод моделирования имеет существенно меньшие ограничения на область применения в сравнении с аналитическими моделями и позволяет получить более достоверные оценки характеристик моделируемой системы. В плане имитационного моделирования следует различать два этапа: этап построения модели и этап планирования эксперимента на модели.

Основными задачами направленных экспериментов являются разработка структурных и динамических свойств математических моделей как формальных объектов и создание на его основе алгоритмических процедур работы с имитационными моделями (рисунок 1).

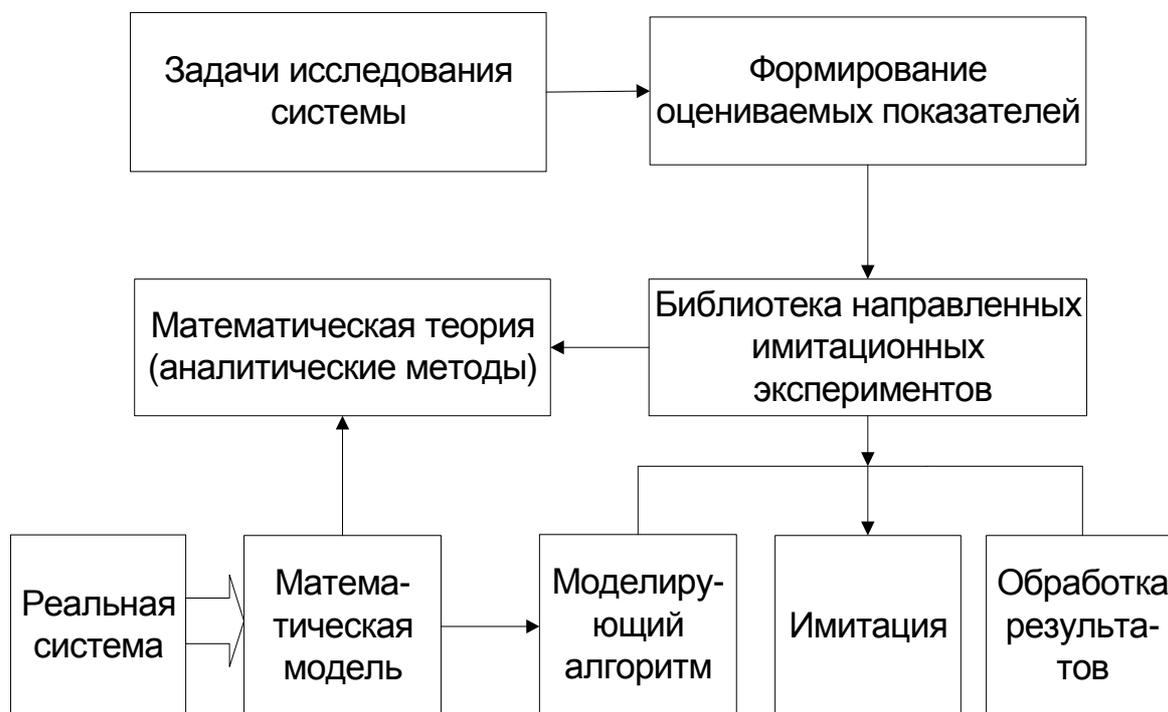


Рисунок 1 - Структура агрегативной имитационной системы

Обзор показал, что в большинстве работ проводится отдельный анализ процессов поиска и имитации. Совмещение указанных процессов порождает управляемый имитационный процесс, анализ которого значительно усложняется в силу появления нестационарного режима при изменении управляемых параметров в ходе эксперимента. Таким образом, возникает необходимость разработки формализованного представления процесса поисковой оптимизации, учитывающего особенности получения оценок посредством программных имитационных моделей.

Модель регенерирующего процесса

Проведен анализ характеристик случайных процессов, присущих процессам управления на имитационных моделях и выделен единственный метод, учитывающий всю информацию (регенеративный метод). Случайный процесс $\xi(t)$ является

регенерирующим, если существуют такие случайные моменты времени, в которых он начинается заново в вероятностном смысле.

При этом он каждый раз попадает в определенную точку фазового пространства (точку регенерации). Моменты времени возвращения в точку регенерации являются моментами регенерации. Особенностью этого процесса является то, что “отрезки” процесса, заключенные между моментами регенерации являются вероятностными копиями друг друга. Это дает возможность получать на каждом интервале регенерации независимые оценки:

$$\hat{Y} = \hat{\xi} / \Delta T; \quad \hat{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\xi}_i; \quad \Delta T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i, \quad (1)$$

где $\hat{\xi}_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i} \xi(t) dt$ - интегральная оценка исследуемого процесса, N – число циклов

регенерации, $\Delta T = T_i - T_{i-1}$ - длительность i-го цикла регенерации.

Решающими правилами для этого метода являются следующие требования: процесс неоднократно возвращается в некоторое фиксированное состояние (или область); среднее время возвращения конечно; моменты очередного возвращения являются моментами регенерации. С целью расширения возможностей этого метода разработаны методы приближенной регенерации и частичной дискретизации пространства состояний. Предполагаются конструктивные методы построения “искусственных” моментов регенерации, что улучшает качество исследования регенерирующих процессов.

Вложенная система моделей транспортных работ

Показано, что организация внутривозвратных транспортировок может быть представлена вложенными моделями СеМО. Кроме того, процесс документооборота и сбора оперативной информации о ходе производства также может быть описан системой вложенных моделей. В связи с этим предлагается методика формирования системы вложенных иерархических моделей для реализации имитационных экспериментов по выбору стратегий управления.

При проведении экспериментов введены следующие обозначения моделей - A|B|C|D|E:

$A \in \{R, Z_j\}$ R - сеть верхнего уровня разомкнута, Z_j - сеть верхнего уровня замкнута, где j - популяция заявок,

$B = N_j$ N- число узлов на верхнем уровне, j - число составных узлов,

C число узлов на вложенном уровне,

$D \in \{\emptyset, K\}$ \emptyset - однотипные заявки, K - разнотипные заявки,

$E \in \{O_j, P_j\}$ O_j - загрузка узлов нижнего уровня $\rho \leq 0.5$, P_j - загрузка узлов нижнего уровня $\rho > 0.5$, j - коэффициент вариации обслуживания в узлах вложенной сети $j = (0, 1, \dots)$.

В общем случае верхний уровень обработки запросов представляется в виде СеМО с неоднородными приоритетными заявками, с произвольным обслуживанием в узлах сети и широким набором дисциплин обслуживания. Нижний уровень, уровень технических средств, обычно представляется моделью с центральным обслуживанием.

С целью получения оценок влияния различных характеристик метода вложенных процессов, выполнен анализ разработанных имитационных моделей с использованием типового фрагмента системы, структурная схема которого приведена на рисунке 2. На верхнем уровне в систему поступает поток заявок, накапливающийся в буфере В1 (внешний поток – поток сторонних организаций). Пройдя первый этап обработки, заявки поступают в буфер В2, и т.д. всего N раз. Этим имитируется N-фазная обработка. Модель обработки запросов представлена компонентами P1 – PM; Q1 – QM. Предполагается, что запрос обрабатывается циклически и определены вероятности переходов - V1, V2 и т.д. Поток I может быть сформирован из заявок разного типа (предусмотрено использование до 4-х типов). Типы заявок отличаются интервалом поступления и маршрутной матрицей.

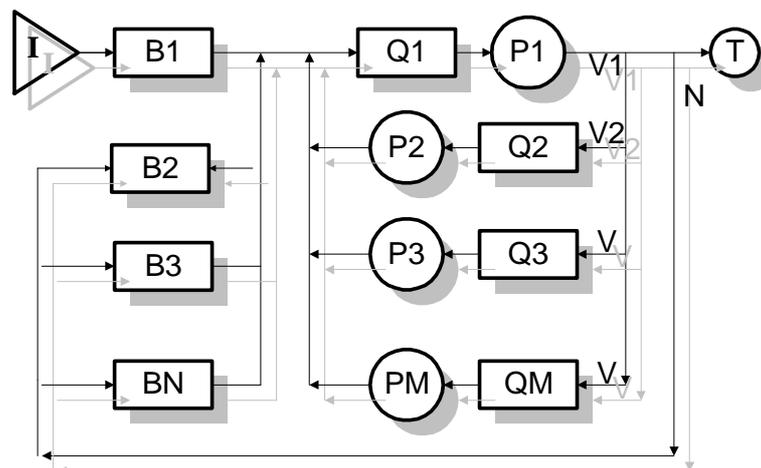


Рисунок 2 - Структура исходной модели

На основе предложенной методики описания вложенных моделей построена параметрически управляемая имитационная модель обработки заявок, структура которой представлена на рисунке 2. В имитационной модели предусмотрена вариация следующих параметров:

- количество узлов на верхнем уровне;
- вид сети верхнего уровня (замкнутая, разомкнутая);
- количество заявок в модели;
- приоритеты заявок;
- матрицы переходных вероятностей;
- функции распределения входных потоков;
- функции распределения обслуживания в узлах сети.

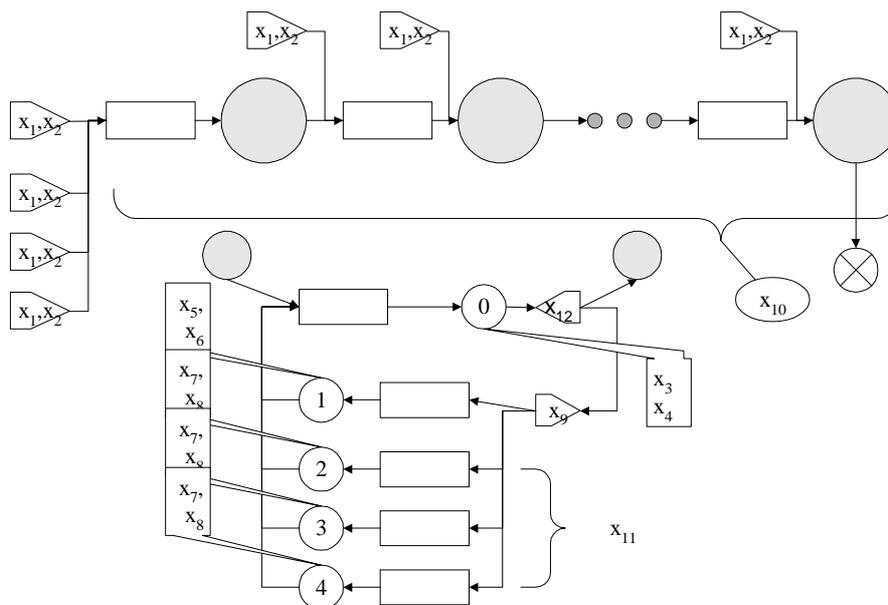


Рисунок 3 - Двухуровневая вложенная модель

Представление исходной структуры системы обработки в виде двухуровневой модели в соответствии с методикой описания вложенных процессов приведено на рисунке 3. Верхний уровень описывает многофазную обработку, нижний – обрабатывающий комплекс. Для целей дальнейшего исследования в качестве варьируемых выделены следующие факторы:

- X_1 - интервал поступления в сеть верхнего уровня заявок первого типа;
- X_2 - коэффициент вариации интервалов между заявками во входном потоке верхнего уровня;
- X_3 - среднее время обслуживания основной фазы (0) на вложенном уровне для всех типов заявок;
- X_4 - коэффициент вариации времени обслуживания в фазе (0) для всех типов заявок;
- X_5 - среднее время обслуживания на первой фазе;
- X_6 - коэффициент вариации обслуживания на первой фазе;
- X_7 - среднее время обслуживания на всех фазах кроме первой;
- X_8 - коэффициент вариации времени обслуживания на всех фазах кроме первой;
- X_9 - вероятность перехода в первую фазу;
- X_{10} - число составных узлов верхнего уровня;
- X_{11} - число узлов нижнего уровня;
- X_{12} – вероятности перехода заявок.

С целью анализа значимости перечисленных выше факторов на основе плана Плакетта-Бермана введены фиктивные факторы X_{13} , X_{14} , X_{15} .

Таблица 1 - Коэффициент вариации для 2-х вложенных узлов

Загрузка узлов вложенного уровня		Коэффициент вариации времени пребывания во вложенных процессах								Модель
0,63	0,635	1,05	1,06	1,20	1,31	1,21	1,01	-	-	R 6 2 P P ₁
0,42	0,937	1,40	1,36	1,43	1,33	1,27	1,36	1,22	1,21	Z ₁₀ 8 2 P ₁
0,35	0,816	1,42	1,32	2,20	1,49	1,97	1,81	1,23	1,55	R 8 2 K P ₀
0,37	0,854	1,55	1,33	1,38	1,37	1,36	1,50	1,53	1,45	R 8 2 P ₁

Таблица 2 - Коэффициент вариации для 4-х вложенных узлов

Загрузка узлов вложенного уровня				Коэффициент вариации времени пребывания во вложенных процессах						Модель
0,201	0,48	0,30	0,11	1,45	1,41	1,49	1,44	-	-	R 4 4 O ₁
0,045	0,37	0,63	0,13	1,44	1,26	1,42	1,37	-	-	R 4 4 K O ₀
0,056	0,44	0,72	0,13	0,81	0,75	0,91	0,88	-	-	Z ₆ 4 4 P ₁
0,063	0,46	0,78	0,14	0,66	0,58	0,71	0,69	0,72	0,67	R 6 4 O ₁
0,059	0,64	0,80	0,67	1,61	1,27	1,53	1,52	1,33	1,28	R 6 4 K P ₁
0,630	0,71	0,08	0,18	1,20	1,15	1,23	1,28	1,26	1,24	Z ₁₀ 6 4 P ₀

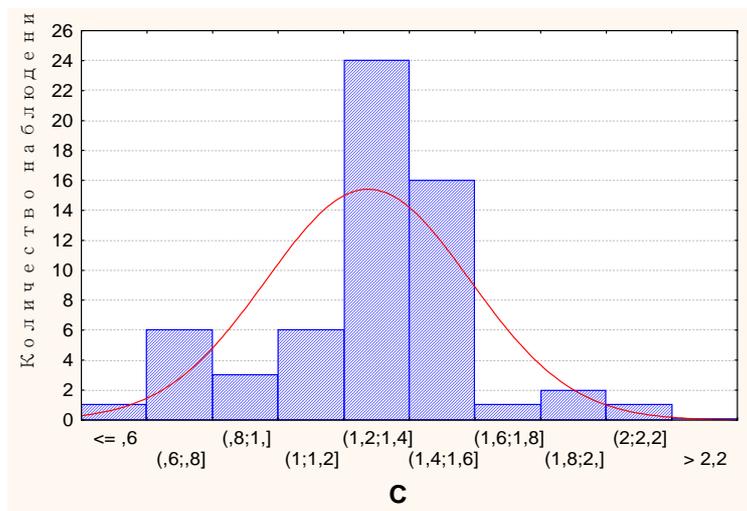


Рисунок 4 - Гистограмма коэффициента вариации

Выполнен анализ функции распределения времени пребывания в заблокированном контуре для модели центрального обслуживания при вероятностном распределении маршрутов обслуживания. Результирующей характеристикой являлся коэффициент вариации времени пребывания во вложенном уровне. В таблице 1 и таблице 2 представлены результаты экспериментов. Было проведено исследование более 50 моделей с различными исходными данными по обслуживанию, топологии и т.д.

На рисунке 4 приведена гистограмма значений коэффициентов вариации, полученная на основании обработки результатов всех экспериментов. Анализ

результатов экспериментов показал значительный разброс коэффициента вариации времен пребывания в моделях вложенного уровня, что указывает на необходимость оценки влияния вариативности времени пребывания в модели нижнего уровня на оценку времени пребывания в системе в целом. Такая оценка влияния выполнена на управляемых имитационных моделях.

Вложенная система моделей транспортных работ

Далее решается задача построения управляемой имитационной модели регенерирующего процесса. Предполагается, что базовая имитационная модель задает параметрическое семейство регенерирующих процессов $\xi_X(t)$.

Предполагается, что для каждого фиксированного значения управляемого параметра X анализ модели может быть проведен регенеративным методом, а оценка целевой функции может быть вычислена с любой, наперед заданной степенью точности. Управление регенерирующим процессом выполняется в предположениях:

- изменения управляемых параметров осуществляются в момент регенерации;
- оценка целевой функции на каждом интервале управления вычисляется на основании достаточно небольшого числа циклов регенерации.

В данном случае оценка целевой функции, полученная на конечном количестве циклов регенерации, является состоятельной. Экстремальный эксперимент для регенерирующих процессов проводился для равномерной сетки пространства управляемых параметров $XX^C \subset XX$. Так в одномерном случае:

$$XX^C = \{X_i\}_{i=0}^1, \forall i \geq 0 X_{(i+1)k} - X_i = \Delta X. \quad (2)$$

В работе проведен анализ однопараметрического пространства состояний, на основании которого получены частные результаты для многомерного случая. В общем случае, задача оптимизации состоит в выборе:

$$X^* = \arg \max Y(X), X \in XX^C, \text{ где } Y(X) = M\xi_X. \quad (3)$$

Для решения этой задачи предложен алгоритм, который последовательно уточняет значения оценок $Y(X)$ в точках сетки XX^C . Каждый j -ый цикл алгоритма определяет пару соседних значений управляемого параметра $X^{j,l}$; $l=0,1$. Для каждого из этих значений вычисляется оценка целевой функции $Y(X^{j,l})$ на основании K циклов

регенерации $\bar{\zeta}(X^{j,l}) = \int_{t_{(2j+l)k_i}}^{t_{(2j+l+1)k}} \bar{\xi}_{X^{j,l}}(t) dt$, где $\bar{\xi}_{X^{j,l}}(t)$ - выборочная траектория

процесса $\xi_{X^{j,l}}(t)$, t_j - моменты регенерации (считается, что точка регенерации одна для всего семейства регенерирующих процессов), $\Delta T(X^{j,l}) = t_{(2j+l+1)k} - t_{(2j+l)k}$ - длительность интервала управления.

На основании оценок $\bar{\zeta}(X^{j,l})$ и $\Delta T(X^{j,l})$ вычисляется $\hat{Y}(X^{j,l}) = \bar{\zeta}(X^{j,l}) \setminus \Delta T(X^{j,l})$. В процессе моделирования накапливаются величины $\bar{\zeta}^0(X_i)$ и $\Delta T(X_i)$ для всех точек сетки $X \in XX_i^C$ где:

$$\widehat{\zeta}^0(X_i) = \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \widehat{\zeta}(X^{j,l}), \Delta T^0(X_i) = \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \Delta T(X^{j,l}). \quad (4)$$

По окончании моделирования вычисляются общие оценки целевой функции сразу для всех значений $X \in \mathbb{X}X_i^C$:

$$\widehat{Y}(X_i) = \widehat{\zeta}^0(X_i) / \Delta T(X_i). \quad (5)$$

В работе показано, что разработанный алгоритм оптимизации на имитационной модели обеспечивает более точную оценку характеристик процесса в области оптимальных параметров, что повышает точность задачи оптимизации.

Управляемая модель задает дискретное распределение вероятностей на пространстве управляемых параметров. Его характеристики определяются на основании расчета стационарных вероятностей, которые в свою очередь зависят от свойств основных процессов $\xi_X(t)$.

Анализ поведения управляемой модели для постоянного коэффициента вариации и дисперсии

В частных случаях, для оценки целевой функции с постоянной дисперсией и постоянным коэффициентом вариации в работе получены аналитические выражения для определения стационарных вероятностей модели в пространстве управляемых параметров.

Для постоянной дисперсии в предельном случае дискретизации пространства состояний выражение для плотности вероятности имеет вид:

$$\omega^\sigma(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(\frac{\beta}{\sqrt{2} \cdot \sigma} [Y(x) - Y(x_0)]\right). \quad (6)$$

Так как экспоненциальная функция монотонно возрастающая, то большим значениям целевой функции соответствуют большие значения плотности распределения $W^\sigma(x)$. Соответственно максимум плотности приходится на максимум целевой функции.

Из графиков (рисунок 5) видно, что чем меньше дисперсия, тем более выражено значение максимума. Так, например, для $\sigma=0.1$ модель будет пребывать 90% всего времени в интервале (5.5, 6.5), содержащем значение максимума.

Для оценки целевой функции с постоянным коэффициентом вариации получено следующее выражение для стационарных вероятностей:

$$\omega(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{1}{\gamma} \ln\left|\frac{Y(x)}{Y(x_0)}\right|\right] = \frac{1}{\alpha} [Y(x)]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (7)$$

В данном случае целевая функция может быть только положительной величиной. При $\gamma=1$ функция плотности вероятности с точностью до постоянного множителя на всем пространстве X совпадает с математическим ожиданием оценки функционала.

Чем меньше коэффициент вариации, тем более выражен максимум плотности вероятности. В пределе при $\gamma=0$ распределение вероятности становится вырожденным.

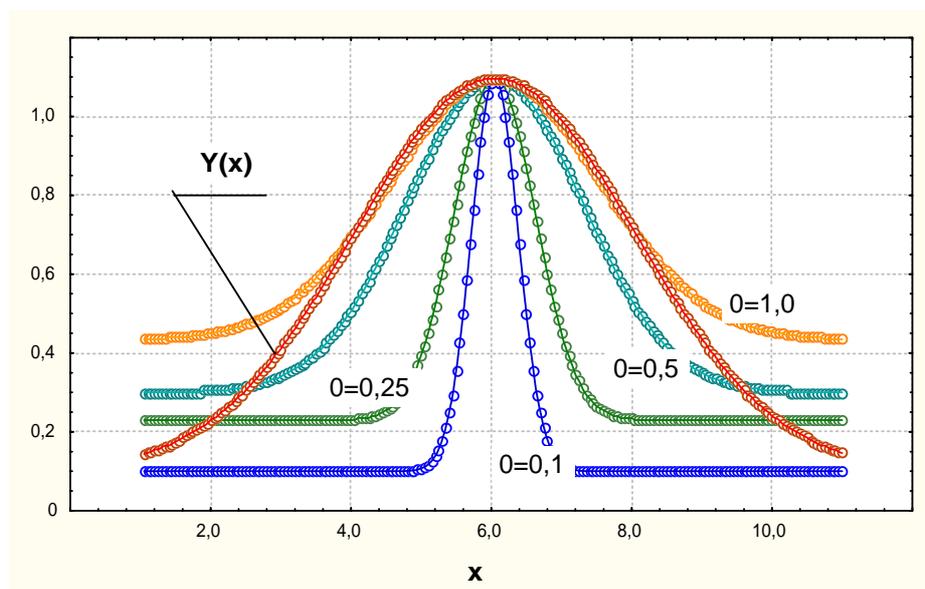


Рисунок 5 - Плотность распределения для постоянной дисперсии

В таблице 3 приведены значения $Y(x)$ и $W(x)$ на том же интервале и для той же функции, что и при постоянной дисперсии, только для различных значений коэффициентов вариации.

Таблица 3 - Значения плотности распределения для постоянного коэффициента вариации

X_i	$N(x_i)/N(x^*)$				$Y(x_i)$
	$\gamma=0.1$	$\gamma=0.25$	$\gamma=0.5$	$\gamma=1.0$	
0.000	0.001	0.060	0.200	0.310	0.100
1.000	0.003	0.250	0.480	0.510	0.424
2.000	0.040	0.510	0.700	0.750	0.676
3.000	0.280	0.730	0.970	0.960	0.856
4.000	0.750	0.860	1.000	0.990	0.964
5.000	1.000	1.000	0.980	1.000	1.000
6.000	0.740	1.000	0.870	0.980	0.964
7.000	0.280	0.770	0.670	0.920	0.856
8.000	0.040	0.450	0.500	0.740	0.676
9.000	0.005	0.140	0.370	0.530	0.424
10.00	0.002	0.020	0.150	0.330	0.100

Таким образом, получены выражения, описывающие поведение управляющей модели в одномерном случае. Для многомерного пространства управляемых

параметров в общем случае не удастся получить аналогичных выражений. Однако, для аддитивной функции могут быть получены аналогичные соотношения.

Заключение

Таким образом, в условиях стохастической неопределенности разработан метод поисковой оптимизации на имитационных моделях. Разработана методика описания вложенных имитационных моделей систем и сетей массового обслуживания. Разработан комплекс вложенных моделей процессов транспортировки. Выполнен анализ функции распределения времени пребывания в заблокированном контуре для модели центрального обслуживания при вероятностном распределении маршрутов обслуживания. Показана необходимость оценки влияния вариативности времени пребывания в модели нижнего уровня на оценку времени пребывания в системе в целом. Предложен алгоритм поиска для класса регенерирующих процессов. Получены аналитические выражения для стационарных характеристик управляемого процесса.

Список информационных источников

- [1] Оптимизация организационной структур управления предприятием / Дицкий В.А., Кузнецов С.А., Свободин В.Ю. // Оптимизация решений в промышленности, строительстве и образовании: сб. науч. тр. МАДИ № 1/45, Ротапринт МАДИ. - М., 2010. - С. 73 - 78.
- [2] Модели аппроксимации интегральной экономической эффективности предприятия / Дицкий В.А., Солнцев А.А., Кузнецов С.А., Алексеев С.Р., Чичерин А.В. // Интерактивные технологии моделирования и управления: сб. науч. тр. МАДИ № 2/46, Ротапринт МАДИ. - М., 2010. - С. 42 - 49.
- [3] Остроух А.В. Автоматизация и моделирование работы предприятий по строительству промышленных объектов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: защищена 07.04.09: утв. 19.06.09. - М., 2009. - 357 с.
- [4] Остроух А.В. Автоматизация и моделирование работы предприятий по строительству промышленных объектов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. - М., 2009. - 43 с.
- [5] Остроух, А.В. Информационные технологии в научной и производственной деятельности [Текст] / [ред. А.В. Остроух] - М: ООО "Техполиграфцентр", 2011. - 240 с. - ISBN 978-5-94385-056-1.
- [6] Остроух, А.В. Исследование начального периода моделирования на точность среднеинтегральной оценки имитационных моделей / А.В. Остроух, А.А. Солнцев, Н.В. Солдатов, К.А. Новицкий, П.С. Якунин // Вестник МАДИ – 2010. - Вып. 2(21). - С. 61-65.