

УДК 519.873

А.А. Рясский, аспирант*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ СНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ***Анализируется распределенная система, обладающая свойствами частичного и полного отказа с применением имитационного агентного моделирования.***Ключевые слова:** *распределенная система, имитационное моделирование, немарковский процесс.*

В последнее время системы с распределенной архитектурой, в которой отдельные подсистемы разделены значительным расстоянием, стали обычны во всем мире. Примеров таких систем множество: системы банковских терминалов, сети автомобильных заводов, сеть донорских пунктов и банков крови, система ПВО и т.д. Элементы реальных систем подвержены свойствам отказа и восстановления, и это снижает эффективность работы этих систем. Поступление заявок в распределенных реальных системах описывается произвольным распределением, а потоки заявок имеют немарковские свойства и, хотя хорошо известны наработки в области полумарковских процессов и аппроксимации потоками Эрланга [1,2], наиболее адекватным представляется подход имитационного моделирования. В области имитационного моделирования и оптимизации распределенных систем имеется перечень работ, из которых в силу ограничений можно указать лишь [3]. В то же время имитационное моделирование и оптимизация мультиагентных распределенных систем обладает определенной научной новизной и актуальностью.

Цель статьи – решить задачу оптимизации работы распределенной системы методом имитационного моделирования.

Рассмотрим содержательную постановку задачи. Одним из наиболее актуальных примеров может служить система контроля производства. Рассмотрим её подробно. Система состоит из набора комплексов ПВО. Комплексы ПВО подвержены отказам. Для приведения их в штатное состояние требуется замена отказавшего устройства. В системе предусмотрена ремонтная инфраструктура, в составе которой находятся склады запасных устройств с известной емкостью и мобильные ремонтные группы. В случае отказа одного и только одного объекта производства, диспетчерская система выдает сигнал о частичном отказе всей системы, по которому ремонтная группа выезжает с автобазы на склад запчастей, и, получив её, перемещается к отказавшему объекту для ремонта, после которого объекта немедленно восстанавливается. Для повышения эффективности работы системы совет директоров выделяет бюджет на модернизацию по двум направлениям. Модернизация объектов производства снижает интенсивность отказов, модернизация ремонтной инфраструктуры увеличивает скорость перемещения мобильных ремонтных групп.

Требуется обеспечивать бесперебойное функционирование системы, при условии, что затраты из бюджета на модернизацию должны быть минимальными.

Цель статьи — исследовать условия, при которых время отказа системы ПВО будет стремиться к нулю, с помощью имитационного моделирования с применением мультиагентного подхода.

Рассмотрим систему с формальной точки зрения.

Элементы, характеризующиеся свойствами отказа и восстановления будем называть объектами обслуживания, и они составляют подсистему A_0 . Мобильные элементы, которые называются коммивояжерами, составляют подсистему коммивояжеров — A_1 . Неподвижные элементы, служащие источниками ресурса восстановления, составляют подсистему A_2 .

Организация работы системы координируется подсистемой диспетчеризации A_3 .

Задана система $S(A, B, G, t_n)$: A — множество подсистем, B — множество связей, G — граф системы, t_n — моменты принятия решений о генерации управляющих сигналов $U\{V, W\}$

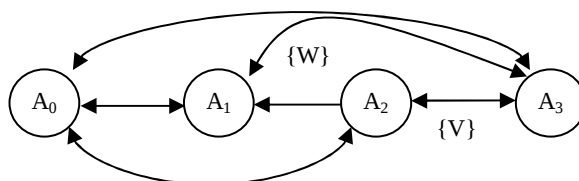


Рисунок 1 — Граф системы

Система обладает свойствами частичного отказа, восстановления, и полного отказа. Отказы формируют поток заявок в системе.

Система имеет три состояния: S_0 — система работоспособна; S_1 — система находится в состоянии частичного отказа; S_2 — система находится в состоянии полного отказа.

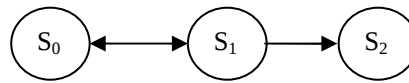


Рисунок 2 – Граф состояния системы

Переход $S_0 \rightarrow S_1$ происходит в момент τ . Переход $S_1 \rightarrow S_2$ происходит в момент $\tau + t_{\text{крит}}$.

Переход $S_1 \rightarrow S_0$ происходит в момент $\tau + t_{\text{восст}}$, если $t_{\text{восст}} < t_{\text{крит}}$. Условие $t_{\text{восст}} < t_{\text{крит}}$ для любого τ является необходимым и достаточным для наступления стационарного режима работы системы. Работу системы оценивает функционал $E\{S, U, R\} \rightarrow \text{extr}$, $u \in U$, $R \in R^0$, где U — множество управляющих сигналов, R — множество ресурсов.

Управляющие сигналы имеют вид: $U\{W, V, \{w\}, \{v\}\}$, где: W — управляющие сигналы для подсистемы коммивояжеров; V — для подсистемы источников ресурсов; w — для коммивояжеров; v — для источников ресурсов.

Для параметрической оптимизации работы системы располагаем ресурсом $M \in R$ и набором оптимизируемых параметров $p_1, \dots, p_n$. M редуцируется в процессе управления параметрами оптимизации

$p_1, \dots, p_n$. Определено n точечных функций вида $p_i = f(M_i)$, где $\sum_{i=1}^n M_i = M$.

Требуется обеспечить работу системы в стационарном режиме с минимальными затратами R .

В обобщенной задаче все элементы системы — узлы сетки с известными координатами. С точки зрения функциональности элементы $a_{0i} \in A_0$ — это объекты обслуживания системы; элементы, обладающие свойствами частичного отказа и полного отказа. Частичный отказ наступает в случайный момент времени τ . Одновременно может отказать один и только один элемент A_0 . Интенсивность отказа задана для всех A_0 , моменты отказов всех объектов имеют одинаковую функцию распределения.

Элементы $a_{1j} \in A_1$ — динамические элементы системы, $a_{1j} \in A_1$ характеризуется пятеркой (x, y, s, t, u) , где s — состояние, (x, y) — положение в сетке, u — управляющий сигнал, t — момент времени. В нулевой момент времени t_0 все элементы A_1 расположены в месте диспозиции, где они ожидают управляющего сигнала из подсистемы диспетчеризации.

Дисциплину функционирования коммивояжера определяет конечный автомат Мили.

Таблица 1 — Таблица переходов и выходов состояний коммивояжера

	S0	S1	S2	S3	S4	S5
w ₀	S1					
w ₁		S2				
w ₂			S3			
w ₃				S4		
w ₄					S5	
w ₅						S0

S0 — коммивояжер свободен; S1 — коммивояжер захвачен; S2 — прибывает к источнику ресурса; S3 — получает единицу ресурса; S4 — находится в пути к объекту обслуживания; S5 — находится в пути к месту диспозиции;

Сигналы: w₀ — захватить коммивояжера; w₁ — свободный источник ресурса найден; w₂ — в наличии имеется свободная единица ресурса; w₃ — направиться к объекту для ремонта; w₄ — объект обслуживания отремонтирован, на этом обслуживание завершено; w₅ — освободить коммивояжера.

Элементы $a_{2k} \in A_2$ характеризуются тройкой (C, S, t) , где C — емкость источника ресурсов, S — состояние, t — момент времени. Назначение элементов — обеспечивать систему ресурсом восстановления. Дисциплину функционирования определяет вероятностный конечный автомат Мили:

Таблица 2 — Таблица переходов и выходов состояний источника ресурсов

	S0	S1	S2	S3
	S1			
v ₁		S2	S3	
v ₂				S2
v ₃			S0	

В таблицу введены следующие обозначения: S0 — склад свободен; S1 — склад занят; S2 — склад не пуст; S3 — склад пуст.

Сигналы: v₀ — занять склад, v₁ — захватить единицу ресурса, v₂ — пополнить склад, v₃ — освободить склад.

Подсистема A_3 физически может быть представлена как набор дуплексных каналов связи между всеми остальными элементами системы.

Введем ограничения: $t_{\text{факт}} < t_{\text{крит}}$, $M_1 + M_2 < M_{\text{огр}}$, $t_{\text{крит}} < t_{\text{огр}}$, $\lambda < \lambda_{\text{огр}}$, $\mu < \mu_{\text{огр}}$.

Начальные условия: $t_{\text{огр}} = 3$, $M_{\text{огр}} = 700$, $\lambda_{\text{огр}} = 0,05$, $\mu_{\text{огр}} = 250$.

Целевая функция: $F(p_1, p_2) \rightarrow \min$.

Можно формулировать цель: определить минимальное число затрат $M_{\min}$, такое, что функционал $E = \max$.

Входными переменными модели являются изменяемые параметры.

На выходе модели должны быть $t_{\text{факт}}$ и $M_{\min}$.

Цель оптимизации – найти минимальное число денежного ресурса, при котором выполняются указанные ограничения.

Задачи, которые должны быть решены, состоят в следующем: построить имитационную модель системы, исследовать модель, провести оптимизацию целевой функции.

Построим имитационную модель в среде AnyLogic™.

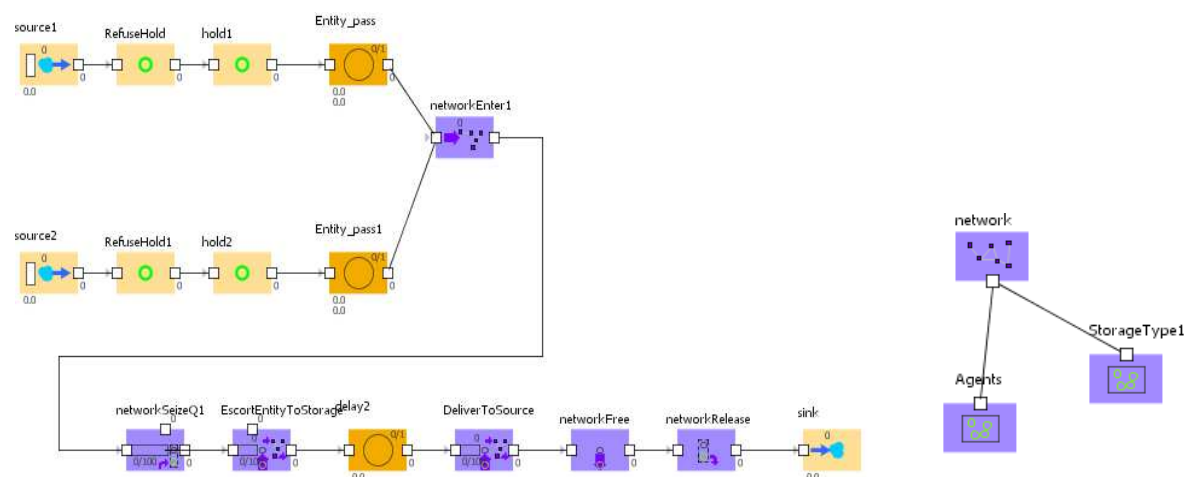


Рисунок 3 – Схема модели

Проведем верификацию модели. До верификации предполагаем, что модель функционирует согласно описанию системы. Было проведено несколько экспериментальных запусков, после чего была оценена реакция модели при следующих нарушениях дисциплины функционирования: если исчерпан запас ресурсов в источниках, если происходит отказ коммивояжера, если подсистема диспетчеризации не пропускает сигнал о частичном отказе устройства.

Таблица 2 — Проведение верификации модели

Нарушение дисциплины функционирования	Ожидаемая реакция
Источники не имеют ресурсов	Система переходит в отказ через $t_{\text{крит}}$
Коммивояжеры не двигаются	Система переходит в отказ через $t_{\text{крит}}$
Отказа не происходит	Заявки не поступают в подсистему диспетчеризации

Модифицируя модель соответствующим образом, видим, что полученные реакции соответствуют ожидаемым. Будем считать, что модель прошла верификацию.

Для того, чтобы доказать, что выходные значения исследуемой модели обладают свойством повторяемости, т.е. не зависят от номера эксперимента, разделим одну большую выборку на 2 группы, и покажем с помощью дисперсионного анализа, что внутригрупповые дисперсии, и общегрупповая дисперсия ничем не отличаются в пределах доверительного интервала.

Таблица 3 — Дисперсионный анализ выборки для исследования свойства повторяемости

Источник вариации	d.f.	SS	MS	$F_{\text{эмп}}$	P	$F_{\text{крит}}$
Между группами	2	0,0316	0,0158	0,0334	0,9671	3,3541
Внутри групп	27	12,7745	0,4731			

где d.f. – degree of freedom, степень свободы; SS – дисперсия; MS – средний квадрат, P – доверительный интервал, $F_{\text{крит}}$ – критерий Фишера для указанного доверительного интервала. Нулевая гипотеза – результаты эксперимента не зависят от его номера.

Так как $F < F_{\text{крит}}$, то полученный результат не противоречит нулевой гипотезе, и можем сказать, что экспериментальная модель обладает свойством повторяемости при данных параметрах исследования.

В системе признаком наступления стационарного режима является безотказная работа системы при $t_{\text{крит}} > t_{\text{факт}} \cdot t_{\text{факт}}$ — фактическое время нахождения устройства в состоянии S_1 до момента $\tau + t_{\text{восст.}}$; $t_{\text{факт}} = t_{\text{факт1}} + t_{\text{факт2}}$, где $t_{\text{факт1}}$ — фактическое время между частичными отказами устройства, $t_{\text{факт2}}$ — фактическое время между частичным отказом и восстановлением устройства. Контроль стационарного режима будем вести помощью булевой функции

$$F(M_1, M_2) = \begin{cases} 1, & \text{если зафиксирован отказ} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Таблица 4 – Область значений булевой функции $F(M_1, M_2)$ при заданных начальных условиях

M_1 M_2	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
165	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
170	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
175	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
180	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
185	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
190	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
195	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Считаем, что рабочая точка M_1, M_2 имеет координаты $\{170; 200\}$.

Исследование влияния параметра M_1 на $T_{\text{факт1}}$.

Гипотеза H_0 : Изменение M_1 не оказывает статистически значимого влияния на $T_{\text{факт1}}$.

Гипотеза H_1 : Изменение M_1 оказывает статистически значимое влияние на $T_{\text{факт1}}$.

Подготовим таблицу экспериментов и получим результат

Таблица 5 — Дисперсионный анализ для исследования влияния параметра M_1 на $T_{\text{факт1}}$

Источник вариации	SS	df	MS	F	p	F критическое
Между группами	3,5242	1	3,5242	6,9293	0,0109	4,012973
Внутри групп	28,4815	56	0,5085			
Итого	32,0058	57				

Полученный результат не противоречит альтернативной гипотезе.

Гипотеза H_0 : Изменение M_2 не оказывает статистически значимого влияния на $T_{\text{факт1}}$.

Гипотеза H_1 : Изменение M_2 оказывает статистически значимое влияние на $T_{\text{факт1}}$.

Таблица 6 — Дисперсионный анализ для исследования влияния M_2 на $T_{\text{факт1}}$

Источник вариации	SS	df	MS	F	p	F критическое
Между группами	6,946	1	6,94	11,5139	0,0015	4,0726
Внутри групп	25,33	42	0,60			
Итого	32,28	43				

Полученный результат не противоречит альтернативной гипотезе.

Аналогичные выводы можно сделать и для $t_{\text{факт2}}$.

Вывод: результаты дисперсионного анализа не противоречат гипотезам о том, что изменение входных параметров M_1, M_2 ведет к статистически значимому изменению выходного параметра $t_{\text{факт}}$. Следовательно, для оптимизации целевой функции можем использовать параметры M_1, M_2 .

Исследуем чувствительность модели.

Таблица 7 — Анализ чувствительности $T_{факт1}$ от входной переменной M_1

ΔM_1	$\Delta T_{факт1}$	$\frac{\Delta M_1}{\Delta T_{факт1}}$	ΔM_1	$\Delta T_{факт2}$	$\frac{\Delta M_1}{\Delta T_{факт2}}$
1	-0,050723	-0,018651	1	-0,050723	0,018651
5	-0,080052	-0,01601	5	-0,080052	0,01601
10	-0,141952	-0,014195	10	-0,141952	0,014195
20	-0,255992	-0,0128	20	-0,255992	0,0128
50	-0,535892	-0,010718	50	-0,535892	0,010718
100	-0,864182	-0,008642	100	-0,864182	0,008642
200	-1,254572	-0,006273	200	-1,254572	0,006273

Таблица 8 — Анализ чувствительности $T_{факт2}$ от входной переменной M_1

ΔM_2	$\Delta T_{факт1}$	$\frac{\Delta M_1}{\Delta T_{факт1}}$	ΔM_2	$\Delta T_{факт2}$	$\frac{\Delta M_1}{\Delta T_{факт2}}$
0	-	0	0	-	0
5	0,014	0,005776	5	-0,087	0,005776
10	-0,087	-0,03745	10	-0,076	-0,03745
50	-0,076	-0,03256	50	-0,113	-0,03256
100	-0,113	-0,04919	100	-0,093	-0,04919
200	-0,093	-0,04014	200	0,014	-0,04014

Таблица 9 — Анализ чувствительности $T_{факт1}$ от входной переменной M_2

	M_2	$\Delta T_{факт1}$	M_2	$\Delta T_{факт1}$	M_2
σ^2	200	1,053768	205	1,214703	210
Мода	200	2,29412	205	2,29412	210
Среднее	200	2,410136	205	2,423787	210
Медиана	200	2,29412	205	2,29412	210

В данной таблице показано различие между средними значениями при изменении значения параметра M_2 с 200 до 210.

Вывод: анализ чувствительности показывает, что параметр M_1 влияет на выходной параметр $t_{факт}$ значительно сильнее, чем параметр M_2 . Тем не менее, влияние M_2 на $t_{факт}$ является статистически значимым.

Решим задачу оптимизации: минимизировать целевую функцию путем оптимизации входных параметров имеющейся имитационной модели.

Для оптимизации применяется метод OptQuest из пакета оптимизационных функций Anylogic™.

Начальные условия:

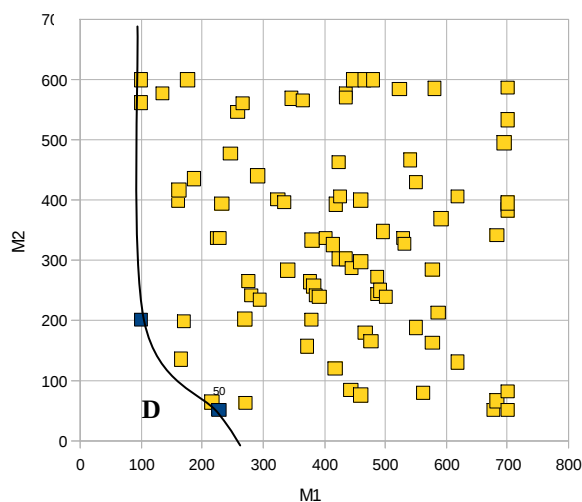


Рисунок 4 — График процесса оптимизации. D – область Парето-оптимального решения

Рабочая точка: $M_1 = 200$; $M_2 = 200$; $t_{\text{крит}} = 3$. Минимальное число оптимизационных прогонов: 62. Найдено оптимальное решение: $M_1 = 227$, $M_2 = 50$. Через найденные точки, являющиеся оптимальными по Парето, можно провести кривую, ограничивающую Парето-оптимальную область решений. На этой кривой будут лежать точки Парето-оптимальных решений, достижимых при заданных начальных условиях.

Результаты проделанных исследований можно сформулировать в следующих выводах:

Задача представлена в формальном виде, построена модель системы, проведена верификация модели.

Дисперсионный анализ показал, что выбранные входные переменные действительно могут служить для оптимизации выходных переменных системы.

Исследована чувствительность выходных переменных модели от оптимизируемых параметров; наиболее значимо на выходные параметры влияет параметр M_1 . Для оптимизации модели использовался алгоритм OptQuest, входящий в состав пакета AnyLogic.

За 62 прогона получено оптимальное решение: $\{M_1 = 227, M_2 = 50\}$. При указанных значениях соблюдаются заданные ограничения, система находится в стационарном режиме, $M_{\min} = 277$.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на поиск оптимальных решений для похожих задач, применяя структурную оптимизацию и варьируя начальные условия.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Корольок В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Корольок, А.Ф. Турбин. — К.: Наук. думка, 1976. — 184 с.
2. Серая О.В. Анализ немарковской системы обслуживания с отказами [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (312 160 bytes). — К.: НБУ ім Вернадського, 2010. — Режим доступа: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/soi/2009_2/Seray.pdf PDF Monday, 11 Sep 2010 10:07:01.
3. Емельянов А.А. Имитационное моделирование экономических процессов: учеб. пособ. / А.А. Емельянов, Е.А. Власова, Р.В. Дума. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 368 с.
4. Шаракшанэ А.С. Сложные системы / А.С. Шаракшанэ, И.Г. Железнов, В.А. Иваницкий. — М.: Наука, 1977. — 248 с.

Поступила в редакцию 17.09.2010 г.

Рясскій О.А. Оптимізація роботи розподіленої системи із застосуванням імітаційного моделювання

Аналізується розподілена система, що має властивості часткової і повної відмови. Запропонована формалізація завдання в галузі теорії операцій. Пропонується вирішення методом імітаційного моделювання в середовищі Anylogic™. У статті наведено дані статистичних випробувань моделі і результати моделювання.

Ключові слова: розподілена система, імітаційне моделювання, немарківський процес.

Ryasskiy A.A. Operation optimization for the distributed supply system using simulation modeling

A distributed system, which has properties of partial and complete failure using simulation agent modeling, is analyzed.

Keywords: distributed system, simulation modeling, non-markov process.