

*Рассматривается один из возможных подходов к вопросу оценки достоверности результатов направленного поиска оптимальных решений, реализованный в рамках системы оптимизационно-имитационного моделирования NEDISOPT\_D и базирующийся на концепции репликационных прогнозов.*

© Ю.М. Черный, 2009

УДК 681.3.06+519.8

Ю.М. ЧЕРНЫЙ

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАПРАВЛЕННОГО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

**Введение.** Одной из важных проблем, которая возникает при исследовании сложных стохастических систем на основе методов и средств имитационного моделирования, является оценка достоверности и интерпретации результатов моделирования. Многоаспектная по своей сути указанная проблема всегда была и остается актуальной.

Исследованию различных аспектов этой проблемы уделяли и уделяют много внимания известные ученые и специалисты в области имитационного моделирования. Здесь прежде всего следует указать на работы Н.П. Бусленко, В.В. Калашникова, И.Н. Коваленко [1], Р. Шеннона [2], Дж. Клейнена [3].

Американские специалисты выполнили цикл работ по проблеме оценки достоверности в рамках соответствующих научно-технических программ и программ Министерства обороны США. На зимней конференции по имитационному моделированию в 1998 г. О. Балчи представил обобщенные результаты исследований по указанному вопросу, сформулированные как своего рода методолого-технологические стандарты решения проблемы оценки достоверности, включающие 15 базовых принципов и 77 различных тестов (приемов), которые рекомендованы для использования на различных стадиях проектирования и реализации имитационных приложений [4].

Американские специалисты выполнили цикл работ по проблеме оценки достоверности в рамках соответствующих научно-

технических программ и программ Министерства обороны США. Результаты дальнейших исследований по этому вопросу были представлены в докладах А. Ло и Р. Сэджента на регулярных конференциях Winter Simulation Conference [5–6].

Особенно важно и необходимо проводить оценку достоверности полученных результатов моделирования при использовании интегрированных оптимизационно-имитационных подходов для поиска из большого множества альтернатив оптимальных проектных решений сложных стохастических систем

**Постановка задачи и определение цели исследования.** Несмотря на общность формализмов и подходов к оценке достоверности результатов моделирования, их практическое использование требует адаптации как к специфике проблемной области, так и к особенностям реализации соответствующих систем моделирования. В связи с этим авторы созданной в Институте кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины системы оптимизационно-имитационного моделирования NEDISOPT\_D разработали унифицированную схему (методику) реализации экспериментов, ориентированную в первую очередь на поддержку задач оценки достоверности. Система NEDISOPT\_D и унифицированная схема разрабатывались на основе таких концепций как *имитационное приложение*, *оптимизационно-имитационная интеграция*, *популяция решений* [7].

Согласно указанной схеме жизненный цикл имитационных приложений представляется методологическим стандартом M & S & R, где M - этап разработки имитационной модели, S - этап реализации оптимизационно-имитационных экспериментов на основе указанной модели, R - этап оценки достоверности конечных результатов моделирования на основе репликационных прогонов.

Цель исследований – в условиях наличия реализованных возможностей поддержки этапов M и S необходимо разработать методы и средства для решения задач оценки достоверности результатов направленного поиска оптимальных решений (R-этапа).

**Особенности реализации основных этапов жизненного цикла имитационных приложений.** Рассмотрим более детально задачи реализации жизненного цикла имитационных приложений.

Первый этап – Modeling (M) связан с процессом построения компьютерной модели и определения доминантных факторов и компонент системы, которые оказывают наибольшее влияние на выходные данные (отклики) модели. Основной функциональной задачей этого этапа является поддержка процедур верификации имитационной модели и валидации входных данных экспериментов с обязательным определением ограничений и критических значений для последних.

Независимо от типа используемой оптимизационной стратегии поиск оптимальных решений может осуществляться только для моделей, для которых исполнены процедуры верификации, валидации и тестирования (в общепринятой нотации VV&T).

В соответствии с методологией имитационного моделирования процесс исследования сложных систем рассматривается как оценивание множества альтернатив с целью выбора альтернативы  $A_{opt}$ , определяющей оптимальные показатели эффективности функционирования моделируемых систем. Поскольку оптимизационные стратегии в системе NEDISOPT\_D базируются на концепции "популяция решений", то этап M должен завершаться формированием начальной популяции хромосом-решений. При этом в качестве генов таких хромосом используются характеристики-факторы соответствующих альтернатив.

Второй этап – Simulation (S) связан с проведением экспериментов, ориентированных на получение оценок адекватности имитационной модели по отношению к реальной системе и поиск оптимальных решений для поставленных задач анализа, проектирования или модернизации сложных систем.

Поскольку процесс поиска и оценивания альтернатив  $A_{opt}$  базируется на использовании соответствующих значений откликов имитационной модели, то значения функции цели для  $A_{opt}$  включают вероятностную составляющую. Последнее требует статистической интерпретации полученных для каждой  $A_{opt}$  значений функции цели (*fitness*-функции) и, как следствие, – разработки схемы и соответствующего сценария репликационных прогонов имитационных моделей, представленного как R (этап жизненного цикла имитационных приложений).

В данном случае идет речь об оценке достоверности результатов направленного поиска оптимальных решений, полученных с применением оптимизационной стратегии на базе генетического алгоритма.

Таким образом, на каждом этапе (M, S и R) жизненного цикла имитационных приложений должна решаться многоаспектная задача оценки достоверности, ориентированная на оценку адекватности как имитационной модели, так и результатов оптимизационно-имитационных экспериментов, реализованных на ее основе.

**Описание задачи модернизации морского порта .** В качестве практического примера для оценки достоверности полученных в результате моделирования проектных решений была рассмотрена задача поиска оптимальных решений модернизации морского порта с нефтеперерабатывающей установкой (НУ) [8]. Для понимания поставленной задачи поиска оптимальных решений здесь приведем краткое описание исследуемой системы. Более детальное описание работы порта приведено в [9].

Как уже упоминалось выше, имеется порт с НУ, которая снабжается нефтью с помощью танкерного флота, который может состоять из танкеров двух типов - дедвейтом 150 000 баррелей (танкер 1-го типа) и дедвейтом 450 000 баррелей

(танкер 2-го типа). Танкеры разгружаются у единственного имеющегося в порту причала, оборудованного специальным резервуаром общей емкостью 2 млн. баррелей. Резервуар предназначен для бесперебойного снабжения НУ нефтью в случае длительного отсутствия танкеров. Существующая суточная потребность НУ в нефти составляет 150000 баррелей (или 6250 бар./ч), а танкерный флот состоит из 15 танкеров 1-го типа.

В результате модернизации НУ суточное потребление нефти возросло до 450000 баррелей (в 3 раза) или до 18750 бар./ч. Вследствие увеличения потребления нефти возникла задача поиска оптимального решения по расширению инфраструктуры порта с учетом затрат как непосредственно на расширение (строительство новых причалов и покупка дополнительных танкеров), так и затрат при дальнейшей эксплуатации НУ и танкеров.

Для применения генетического алгоритма при поиске оптимальных проектов модернизации порта в качестве генов-факторов для хромосом-решений, описывающих возможные проекты-альтернативы, были выбраны следующие изменяемые параметры: количество причалов, количество танкеров 1-го типа, количество танкеров 2-го типа. В табл. 1 для каждого фактора приведены допустимые границы изменения, шаг квантования и общее количество уровней.

ТАБЛИЦА 1. Множество уровней генов-факторов

Наименование гена-фактора	Допустимые границы изменения	Шаг квантования	Количество уровней	Идентификатор
Количество причалов	2 – 3	1	2	N_BRTH
Количество танкеров 1-го типа	23 – 48	1	26	N_TNK1
Количество танкеров 2-го типа	0 – 5	1	6	N_TNK2

В табл. 2 приведены показатели функционирования порта, которые были выбраны на этапе М жизненного цикла приложения в качестве основных откликов имитационной модели для определения оптимальных решений. Для корректной работы генетического алгоритма была определена *fitness*-функция, значение которой зависело от значений параметров, описанных в табл. 1 и 2.

В результате проведенных на S-этапе оптимизационно-имитационных экспериментов была определена группа хромосом-решений с наилучшими *fitness*-значениями (строки 1–3 в табл. 3), а также группа хромосом (строки 4–6 в табл. 3) с *fitness*-значениями, близкими к оптимальным, и которые, с учетом стохастической природы *fitness*-функции, могли составить конкуренцию оптимальной группе.

ТАБЛИЦА 2. Отклики имитационной модели

Показатели функционирования порта (отклики)	Идентификаторы откликов
Количество простоев НУ	NS_RFNR
Среднее время простоя НУ	AVS_RFNR
Количество простоев танкеров 1-го типа	NS_TNK1
Среднее время простоя танкеров 1-го типа	AVS_TNK1
Количество простоев танкеров 2-го типа	NS_TNK2
Среднее время простоя танкеров 2-го типа	AVS_TNK2

ТАБЛИЦА 3. Значения факторов и откликов оптимальных решений

№ п/п	Хромосома-решение			Отклики модели						fitness-значение
	N_BRTH	N_TNK1	N_TNK2	NS_RFNR	Общее время простоя НУ, %	NS_TNK1	AVS_TNK1, часов	NS_TNK2	AVS_TNK2, часов	
1	3	27	5	0	0,000000	3092	5,102	510	3,364	377,979
2	3	38	1	0	0,000000	4422	5,239	105	3,802	381,406
3	3	41	0	0	0,000000	4774	5,279	0	0,000	383,184
4	3	30	4	0	0,000000	3436	6,032	409	3,712	392,704
5	3	33	3	0	0,000000	3785	7,322	305	4,039	412,683
6	3	35	2	28	0,004195	4056	5,061	206	3,757	419,637

В табл. 3 среди откликов модели под общим временем простоя НУ, выраженным в процентах, понимается отношение произведения  $NS\_RFNR \cdot AVS\_RFNR$  к общей моделируемой длительности одного прогона сеанса моделирования (без учета времени начального этапа разгона).

Для всех шести отобранных хромосом на R-этапе были осуществлены репликационные прогоны, статистические результаты которых представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Статистические показатели fitness-значений и откликов модели по результатам репликационных прогонов

№ п/п	N_BRTH	N_TNK1	N_TNK2	Среднее значение времени простоя НУ, %	Стандартное отклонение времени простоя НУ	Среднее значение AVS_TNK1	Стандартное отклонение AVS_TNK1	Среднее значение AVS_TNK2	Стандартное отклонение AVS_TNK1	Среднее значение fitness-функции	Стандартное отклонение fitness-функции
1	3	27	5	0,00005	0,00014	5,394	0,4803	3,658	0,2473	383,444	7,4448
2	3	38	1	0,00017	0,00027	5,132	0,2260	3,923	0,4094	381,593	5,0280
3	3	41	0	0,00000	0,00000	5,214	0,1998	0,000	0,0000	382,207	2,9937
4	3	30	4	0,00003	0,00010	6,070	0,3046	4,019	0,2921	394,477	4,6948
5	3	35	2	0,00245	0,00167	4,991	0,3666	3,779	0,5322	401,269	21,2987
6	3	33	3	0,00001	0,00002	6,939	0,4615	4,353	0,5271	408,116	6,6319

Как видно из полученных результатов, для всех хромосом первой группы были подтверждены оценки их *fitness*-значений, и каждая из них может рассматриваться как оптимальная с учетом полученных статистических данных. Выбор одной из них в качестве единственного решения может быть сделан на основе дополнительных или не учитываемых в модели показателей.

Следует отметить, что ни одна из хромосом второй группы значительно не улучшила свою *fitness*-оценку и не смогла составить конкуренцию хромосомам первой группы.

**Заключение.** Разработанные в результате проведенных исследований методы и средства поддержки репликационных прогонов обеспечивают получение статистической значимости конечных результатов поиска оптимальных решений. Последнее позволяет делать более корректные выводы относительно задач выбора ответственных проектных или управленческих решений.

Использование полученных результатов связано с оценкой эффективности предложенных алгоритмов и средств при решении конкретных практических задач.

К перспективным направлениям в области решения многоаспектных проблем оценки достоверности в первую очередь следует отнести дальнейшее развитие формальных методов и эмпирических подходов с учетом накопленного опыта в различных прикладных областях.

*Ю.М. Чорний*

ОЦІНЮВАННЯ ВІРОГІДНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ НАПРАВЛЕНОГО ПОШУКУ  
ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

Розглядається один із можливих підходів до питання оцінювання вірогідності результатів направлено пошуку оптимальних рішень, що реалізований в рамках системи оптимізаційно-імітаційного моделювання NEDISOPT\_D та базований на концепції реплікаційних прогонів.

*Yu.M. Tchornyu*

RELIABILITY EVALUATION FOR THE RESULTS OF DIRECTED SEARCH OF OPTIMAL  
DECISIONS

The possible approach to the problem of reliability evaluation for the results of directed search of optimal decisions is considered. This approach is based on the conception of replications runs and was implemented in the optimization-simulation system NEDISOPT\_D.

1. Бусленко Н.П., Калашиников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем.– М: Сов.радио, 1973.– 440 с.
2. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука.– М.: Мир, 1973.– 440 с.
3. Kleijnen J.P.C.. Design and Analysis of Simulation Experiments.– New York: Springer, 2008.– 216 p.
4. Balci O. Verification, validation and accreditation // Proc. of the Winter Simulation Conf. – 1998.– P. 41–48.
5. Law A.M. Statistical Analysis of Simulation Output Data: The Practical State of the Art // Proc. of the Winter Simulation Conf. – 2007.– P. 77–83.
6. Sargent R.G. Verification and Validation of Simulation Models // Proc. of the Winter Simulation Conf. – 2008.– P. 157–169.
7. Бігдан В.Б., Пенеляєв В.А., Чорний Ю.М. Уніфікована схема реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів // Проблеми програмування.– 2006. – № 2–3. – С. 714–723.
8. Пенеляєв В.А. Об оценке эффективности оптимизационных метаэвристических стратегий // Теорія оптимальних рішень.– 2006.– № 5.– С. 16 – 22 .
9. Коваль В.П., Пенеляєв В.А., Черный Ю.М. Об оценке альтернативных решений на основе методов имитационного моделирования // Теорія оптимальних рішень.– 2004.– № 3.– С. 19 – 26.

Получено 20.03.2009