

Предложен один из возможных подходов к оценке эффективности оптимизационных метаэвристических стратегий, реализованных в рамках интегрированных сред систем имитационного моделирования. Рассматриваются процедуры получения такого рода оценок применительно к имитационным приложениям, разработанным на базе оптимизационно-имитационной системы НЕДОПТ.

© В.А. Пепеляев, 2006

УДК 681.03.36+519.8

В.А. ПЕПЕЛЯЕВ

ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ СТРАТЕГИЙ

Введение. В связи с широким внедрением концепции и методов оптимизационно-имитационной интеграции в практику исследования и проектирования имитационных систем актуальными становятся задачи оценки эффективности таких подходов. Рассмотрению и анализу указанных проблем посвящены многие зарубежные публикации, в том числе материалы ежегодных конференций Winter Simulation Conference [1–5]. Цель данной работы – представление разработанного в Институте кибернетики НАН Украины им.В.М.Глушкова подхода к решению задач оптимизации имитационного моделирования и получение оценок эффективности используемых оптимизационных стратегий.

В Институте кибернетики выполнены исследования по созданию оптимизационно-имитационной системы НЕДОПТ и унифицированной схемы разработки имитационных приложений на ее основе, которые обеспечивают сокращение затрат временных и финансовых ресурсов на поиск оптимальных решений применительно к задачам анализа, модернизации или проектирования сложных систем. Интегрированная программная среда НЕДОПТ включает систему распределённого имитационного дискретно-событийного моделирования НЕДИС-Р и базированный на метаэвристических стратегиях оптимизатор [6]. Система НЕДИС-Р обеспечивает традиционное моделирование сложных систем на базе сосредоточенных или распределённых версий имитационных приложений [7].

НЕДИС – оптимизатор поддерживает поиск оптимальных решений согласно выбранной исследователем стратегии (последовательный перебор вариантов или метаэвристические стратегии на основе генетического алгоритма) [8].

Постановка задачи. Исследования на базе системы НЕДОПТ реализуются как оптимизационно-имитационные эксперименты, опирающиеся на концепцию "популяция решений". Согласно принятой в НЕДОПТ унифицированной схеме поэтапной реализации таких экспериментов каждое исследование осуществляется в три этапа.

На первом этапе на основе методолого-технологических стандартов, принятых в современной мировой практике имитационного моделирования, проектируется и разрабатывается имитационная модель исследуемой системы и соответствующие версии сценариев имитационных экспериментов. После завершения процедур верификации и валидации последних, включая входные данные эксперимента, формируется имитационное приложение. При этом особое внимание уделяется вопросам выбора множества откликов (выходов) имитационной модели, а также подмножества входных данных, так называемых факторов, которые оказывают наибольшее влияние на отклики. В методологии имитационного моделирования факторы рассматриваются как характеристики оцениваемых по ходу исследований различных альтернатив. При этом для оценки каждой отдельной альтернативы требуется однократный прогон имитационной модели. В свою очередь факторы и отклики используются для подсчета значений функции цели, которые и определяют в конечном итоге искомую оптимальную альтернативу. На первом этапе должны быть установлены допустимые уровни изменения факторов, включая критические значения, и предельные уровни откликов. Множество факторов (с учетом допустимых уровней их изменения) для соответствующих альтернатив используется для формирования популяций решений на последующих этапах исследования.

На втором этапе с учетом выбранной стратегии оптимизации осуществляется поиск оптимальных решений (оптимальных альтернатив). Для схемы последовательного перебора вариантов популяция решений формируется как полное множество всех возможных альтернатив, представленных хромосомами-решениями, в роли генов которых выступают соответствующие факторы. Для метаэвристических стратегий могут быть сформированы различные версии начальной популяции. Важным моментом здесь является корректный выбор размера популяции и таких параметров генетического алгоритма как точность процесса эволюции, тип модели селекции, операторов кроссовера и параметров мутации.

Третий этап исследований связан с получением оценок достоверности и устойчивости найденных оптимальных решений.

Эффективность исследования на основе системы НЕДОПТ зависит от общего количества прогонов имитационной модели N , которое определяется согласно формуле

$$N = N_t + N_s + N_r \quad (1)$$

где N_t – число прогонов имитационной модели на первом этапе (зависит от принятой тактики реализации имитационных экспериментов); N_s – число прогонов имитационной модели на этапе поиска оптимальных решений (зависит от используемой стратегии оптимизации); N_r – число так называемых репликационных прогонов имитационной модели, требуемых для статистической интерпретации значений функций цели, поскольку значение входящих в ее определение откликов является случайными величинами.

Заметим, что значения N_r и N_t в значительной степени зависят от опыта и профессионального уровня исследователей, экспертов и других разработчиков имитационных приложений в соответствующей проблемной области.

Наиболее объективным показателем эффективности оптимизационно-имитационных экспериментов является показатель N_s , который в общем случае определяется по формуле:

$$N_s = (q_1)(q_2)...(q_k) \quad (2)$$

где k – множество варьируемых факторов; q_i – число уровней квантования каждого i -го фактора ($i=1,2,...,k$).

Таким образом, основная цель планирования и реализации оптимизационно-имитационных экспериментов – минимизация значения N , в первую очередь за счет составляющей N_s .

Для схемы последовательного перебора вариантов N_s определяется по формуле (2). Для метаэвристических стратегий оптимизации значение N_s зависит от размера начальной популяции и параметров процесса эволюции последней.

Одним из результатов настоящей работы является определение сравнительных характеристик N_s , полученных на основе схемы последовательного перебора вариантов ($N_s S$) и метаэвристической стратегии ($N_s G$).

Пример исследования реальной системы. Рассматривается процесс поиска оптимального проекта модернизации дока, включающего в свою инфраструктуру нефтяной терминал и нефтеперерабатывающую установку (НУ). Нефть для дока поставляется с помощью танкерного флота, представленного танкерами двух типов. Детальное описание указанного дока приведено в [9].

Возникла задача оценки проектных альтернатив, поддерживающих трёхкратное повышение мощности НУ в условиях её бесперебойной работы при минимальных финансовых затратах, необходимых для развития инфраструктуры дока (сооружения новых причалов), приобретения (аренды) дополнительного числа танкеров и возмещения возможных потерь, которые будет нести порт в процессе эксплуатации терминала и НУ.

На основании анализа особенностей функционирования указанного дока и поставленной задачи его модернизации определено множество показателей функционирования порта, являющихся откликами имитационной модели (табл. 1). При этом в качестве главного показателя эффективности функционирования проектируемого дока выступает количество простоев НУ.

ТАБЛИЦА 1. 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

В табл. 2 приведен перечень основных факторов, характеризующих оцениваемые проектные альтернативы. Пределы изменения указанных факторов и уровни их квантования были оценены на первом этапе исследований.

ТАБЛИЦА 2. Множество уровней генов-факторов

Наименование гена-фактора	Идентификатор гена-фактора	Допустимые уровни изменений	Количество уровней
Количество причалов	N_BRTH	2,3	2
Количество типов танкеров	N_TT	2	1
Количество танкеров 1-го типа	N_TNK1	20,21,...,45	26
Количество танкеров 2-го типа	N_TNK2	0,1,2,3,4	5
Мощность нефтеустановки	PW_RFNR	450.0	1

Анализ результатов.

Экспериментирование на втором этапе осуществлялось для двух оптимизационных стратегий (схемы последовательного перебора вариантов и генетического алгоритма).

Для схемы последовательного перебора вариантов популяция решений формировалась как полное множество всех альтернатив, определенных согласно табл. 2. При этом размер популяции (*PopulSize*) равнялся числу прогонов имитационной модели $N_s S$, которое определялось согласно (2):

$$PopulSize = N_s S = 2 \cdot 1 \cdot 26 \cdot 5 \cdot 1 = 260$$

Для схемы генетического алгоритма были проведены пробные исследования на базе начальных популяций, для которых *PopulSize* равнялся 24, 32 и 40 соответственно (табл. 3). Хромосомы-решения для каждой из указанных популяций выбирались на основе детального анализа уровней квантования факторов из табл. 2.

В соответствии с реализованной в НЕДОПТ оптимизационной метаэвристической стратегией поиск оптимизационных альтернатив осуществлялся на основе поэтапной эволюции (с этапом разгона) начальных популяций. Число поколе-

ний популяций как на этапе разгона, так и на последующих этапах, равно трем. Общее число этапов принято равным десяти. Процесс эволюции завершался либо по достижении заданного числа этапов, либо по удовлетворению заданного критерия точности.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительные характеристики оптимальных альтернатив для различных *PopulSize*

Thresh (в %)		Epsilon					NumE		NumGenE		InMod (год)	
75		0.05					10		3		3	
PopulSize	Хромосома – решение					Нефте-установка		Танкеры 1-го типа		Танкеры 2-го типа		fitness-значение
	N_BRTH	N_TT	N_TNK1	N_TNK2	PW_RFNR (тб)	NS_RFNR	PVS_RFNR (в%)	NS_TNK1	AVS_TNK1 (часы)	NS_TNK2	AVS_TNK2 (часы)	
24	3	2	38	1	450	0	0	3358	4,76	79	3,71	374,32
32	3	2	38	1	450	0	0	3354	4,56	79	3,92	371,59
40	3	2	35	2	450	8	0,14	3082	4,34	157	2,83	377,43

В табл. 3 приняты следующие обозначения: Thresh – доля элитных особей в популяции (данные получены для версии оптимизационной стратегии, в которой модель селекции базируется на использовании порога отсека неэлитных особей); Epsilon – априорно заданная точность достижения оптимального решения; NumE – число этапов эволюции; NumGenE – число поколений в одном этапе эволюции; InMod – доверительный интервал моделирования; PVS_RFNR – процент простоя НУ (отношение суммарного времени простоя НУ к общему времени моделирования – InMod); fitness-значение – это значение функции цели, определяющее пригодность хромосомы для репродукции следующих поколений.

Искомые оптимальные альтернативы оценивались на основе таких характеристик как процент простоя нефтеустановки и fitness-значение. Естественно, что для оптимальной альтернативы значения этих характеристик должны быть минимальными.

Данные табл. 3 свидетельствуют о возможности использования в качестве начальной популяции размером в 24 хромосомы. Для указанной популяции было получено $N_s G = 146$.

В табл. 4 приведены характеристики оптимальных альтернатив, полученные по схеме последовательного перебора вариантов. В результате наилучшими хромосомами-решениями при заданном выражении для fitness-функции являются хромосомы, содержащие следующие множества генов-факторов: {3, 2, 41, 0, 450} и {3, 2, 38, 1, 450}. Выбор единственной хромосомы-решения должны осуществить эксперты.

ТАБЛИЦА 4. Сравнительные характеристики оптимальных альтернатив для схемы последовательного перебора вариантов

PopulSize	Хромосома – решение					Нефте-установка		Танкеры 1-го типа		Танкеры 2-го типа		fitness-значение
	N_BRTH	N_TT	N_TNK1	N_TNK2	PW_RFNR (тб)	NS_RFNR	PVS_RFNR (в%)	NS_TNK1	AVS_TNK1 (часы)	NS_TNK2	AVS_TNK2 (часы)	
	3	2	38	1	450	0	0	3354	5,10	79	3,23	382,20
	3	2	41	0	450	0	0	3624	5,28	0	0	382,40
	3	2	30	4	450	0	0	2605	6,17	308	3,81	394,82
	3	2	33	3	450	0	0	2871	6,50	229	5,10	403,60

Сравнение хромосом-решений для генетического алгоритма и схемы последовательного перебора вариантов показало, что хромосома с генами-факторами {3, 2, 38, 1, 450} определяет оптимальную альтернативу, что было подтверждено репликационными прогонами.

На первом этапе исследования процесса функционирования морского дока реализовано 35 прогонов имитационной модели ($N_i = 35$), на третьем этапе – 30 прогонов ($N_f = 30$). Как уже указывалось, эти значения не зависят от используемой оптимизационной стратегии.

В данном случае показатель эффективности в реализованной в НЕДОПТ оптимизационной метаэвристической стратегии *CEF* определяется согласно формуле $CEF = N_s S / N_s G$.

С учетом полученных значений $N_s S$ и $N_s G$ показатель $CEF = 260 / 146 \approx 1,8$, что свидетельствует об уменьшении числа прогонов имитационной модели в 1,8 раза и подтверждает преимущество метаэвристической стратегии на базе генетического алгоритма по сравнению со схемой последовательного перебора вариантов. Однако, необходимо заметить, что полученные результаты не следует воспринимать как абсолютные, поскольку эффективность оптимизационной метаэвристической стратегии в значительной мере зависит от корректного выбора как размера начальной популяции, так и её состава, что требует тщательного планирования оптимизационно-имитационных экспериментов на первом этапе исследования сложных систем.

Заключение. Предложенный в данной работе подход к оценке эффективности реализованных в системе НЕДОПТ оптимизационных метаэвристических стратегий носит общий характер и может быть использован при исследовании различных типов реальных систем.

Перспективные направления исследований в области оптимизации имитационного моделирования связаны с оценкой эффективности распределённых методов и схем направленного поиска оптимальных решений.

В.А. Пепеляев

ПРО ОЦІНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МЕТАЕВРИСТИЧНИХ СТРАТЕГІЙ

Запропоновано один з можливих підходів до оцінки ефективності оптимізаційних метаевристичних стратегій, що реалізовані в рамках інтегрованих середовищ систем імітаційного моделювання. Розглянуто процедури отримання такого роду оцінок щодо імітаційних застосувань, розроблених на базі оптимізаційно-імітаційної системи НЕДОПТ.

V.A. Pepeliaev

ABOUT EFFECTIVENESS OF METAHEURISTIC OPTIMIZATION STRATEGIES

One of the possible approaches to estimate the effectiveness of metaheuristic optimization strategies implemented in the framework of the integrated simulation environments is proposed. Concerning simulation applications developed in simulation-optimization system NEDOPT the procedures to estimate the above strategies' effectiveness are considered.

1. *Whitley D.* An overview of evolutionary algorithms // *J. of Information and Software Technology.* – 2001. – N 43. – P. 817–831.
2. *Fu M.* Optimization for Simulation: Theory and Practice // *INFORMS J. on Computing.* – 2002. – N 14 (3). – P. 192–215.
3. *April J., Glover F., Kelly J.P., Laguna M.* Practical introduction to simulation optimization // *Proc. of the 2003 Winter Simulation Conf.* – 2003. – P. 71–78.
4. *Davis D.M., Baer G.D., Gottschalk T.D.* 21st Century Simulation: Exploiting High Performance Computing and Data Analysis // *Interservice/ Industry Training Simulation, and Education Conf.* – Paper N 1517. – 2004. – P.1–14.
5. *Chen E.J.* Using parallel and distributed computing to increase the capability of selection procedures // *Proc. of the 2005 Winter Simulation Conf.* – 2005. – P. 723–731.
6. *Біздан В.Б., Пепеляев В.А., Чорний Ю.М.* Уніфікована схема реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів // *Проблеми програмування.* – 2006. – № 2–3. – С. 728–733.
7. *Галаган Т.Н., Гусев В.В., Марьянович Т.П., Яценко Н.М.* Один подход к автоматизации построения распределённой модели из её сосредоточенного аналога // *Проблемы программирования.* – 2002. – № 1–2. – С. 182–187.
8. *Пепеляев В.А., Сахнюк М.А., Чёрный Ю.М., Шваб Н.Д.* К вопросу о реализации метаэвристических стратегий оптимизации моделирования // *Компьютерная математика.* – 2005. – № 2. – С.26–33.
9. *Коваль В.П., Пепеляев В.А., Чёрный Ю.М.* Об оценке альтернативных решений на основе методов имитационного моделирования // *Теория оптимальных решений.* – 2004. – № 3. – С. 19–26.

Получено 04.07.2006