

Рассматриваются особенности применения базированного на концепциях имитационно-оптимизационной интеграции и метаэвристических стратегий оптимизации подхода к разработке имитационных приложений, ориентированных на поиск оптимальных проектных решений для исследуемых систем.

© В.А. Пепеляев, 2005

УДК 681.3.06+519.8

В.А. ПЕПЕЛЯЕВ

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ СТРАТЕГИЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Введение. В последние годы в зарубежной практике исследования и проектирования сложных систем широкое распространение получили подходы, базирующиеся на концепциях оптимизационно-имитационной интеграции. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации в зарубежных изданиях и материалы различных конференций, например Winter Simulation Conference (WSC'2000 – WCS'2003) [1, 2]. Особое место здесь занимают подходы, объединяющие возможности методов имитационного моделирования и метаэвристических стратегий оптимизации. Такая интеграция основана на том факте, что как методы имитационного моделирования, так и метаэвристические стратегии оптимизации, не будучи градиентно-ориентированными по своей природе, могут использоваться для решения различного рода оптимизационных задач применительно к системам, для определения которых отсутствуют строгие математические формулировки. Поскольку методология и технология оптимизационно-имитационной интеграции в практике отечественного имитационного моделирования находится в начальной стадии своего развития, актуальными являются вопросы разработки и практического применения программных средств их поддержки.

Постановка задачи. Как показал зарубежный опыт использования средств оптимизации имитационного моделирования повышение эффективности процессов поиска оптимальных решений в первую очередь обеспечивается за счет применения методолого-

технологических стандартов, регламентирующих разработку имитационных приложений.

Цель данной работы – формулировка требований и определение эвристических приемов применительно к созданию имитационных приложений, ориентированных на поиск оптимальных проектных решений для исследуемых систем. Заметим, что речь идёт о практическом применении разработанного в Институте кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины подхода к решению такого рода задач, который базируется на концепциях оптимизационно-имитационной интеграции и метаэвристической стратегии оптимизации. Программная среда поддержки указанного подхода сформирована на основе интеграции системы имитационного моделирования НЕДИС-Р и системы оптимизации – НЕДИС-ОПТИМИЗАТОР [3, 4].

Особенности реализации метаэвристической стратегии оптимизации.

Метаэвристическая стратегия оптимизации, принятая в системе НЕДИС-ОПТИМИЗАТОР базируется на генетическом алгоритме [5, 6]. Кратко опишем схему реализации указанной стратегии. Поиск оптимального решения для исследуемой системы осуществляется в процессе поэтапной с регулярной сменой поколений эволюции популяции хромосом-решений. При этом хромосомы структурируются как множество генов-факторов, являющихся характеристиками оцениваемых проектных альтернатив. Каждое поколение популяции характеризуется собственным вектором fitness-значений, которые подсчитываются на основании выражения для функции цели, определенном в рамках сформулированной оптимизационной задачи. Согласно схеме генетического алгоритма любое новое поколение создается в результате применения соответствующих моделей сортировки и операторов кроссовера (рекомбинации) и мутации к хромосомам текущего поколения. Реализованная модель сортировки в НЕДИС-ОПТИМИЗАТОРЕ на основании априорно заданного "порога отсеечения", обеспечивает формирование и упорядочение элитного подмножества хромосом с учетом их fitness-значений. Оставшиеся за порогом отсеечения особи-хромосомы умирают, а им на смену приходят потомки, порожденные от элитных родителей. В НЕДИС-ОПТИМИЗАТОРЕ в настоящее время реализован одноточечный кроссовер и параметрическая мутация генов, позволяющая мутировать гены избирательным образом. Гены каждого нового потомка проверяются на выполнение заданных ограничений. Проверка на окончание процесса поиска оптимального решения в соответствии с выбранным критерием и априорно заданной точностью осуществляется после завершения каждого очередного этапа.

Определение требований к разработке имитационных приложений.

В соответствии с методолого-технологическими стандартами, принятыми в современной практике имитационного моделирования, сформулируем основные требования к разработке имитационных приложений, ориентированных на поиск оптимальных решений в условиях использования интегрированной оптимизационно-имитационной среды [7].

1. Имитационные приложения традиционно включают три компоненты:

имитационную модель исследуемой системы, сценарии эксперимента и используемые в эксперименте данные.

2. Модель должна отображать только те аспекты системы, которые соответствуют задачам исследования. В связи с этим в определение имитационной модели в первую очередь включаются компоненты, оказывающие наибольшее влияние на отклики (выходы модели). При этом наряду с параметрами, задающими структурно-потокосые и функциональные характеристики системы, определяются параметры, характеризующие оцениваемые альтернативные проектные решения (факторы).

3. Сценарий эксперимента имеет двухуровневую структуру. Сценарий верхнего уровня управляет процессом поиска оптимальных решений согласно реализованной в НЕДИС-ОПТИМИЗАТОРЕ метаэвристической стратегии оптимизации. Процедуры нижнего слоя представляют традиционный сценарий имитационного эксперимента, обеспечивающий запуск прогонов имитационной модели, регистрацию значений наблюдаемых откликов, контроль останова и завершение прогонов, определение и выдачу fitness-значений [2].

4. Используемые в экспериментах входные данные структурируются в файлах, привязанных к сценариям соответствующего уровня. Так, для сценариев верхнего уровня задаются управляющие процессом поиска оптимальных решений параметры. Сценарий нижнего уровня использует следующую входную информацию: факторы, множество параметров, управляющих процессом прогона имитационной модели (доверительный интервал моделирования, интервал разогрева модели, шаг тактировки процесса моделирования), структурно-потокосые и функциональные характеристики исследуемой системы, параметры, управляющие процессом регистрации и выдачи результатов моделирования (в том числе откликов модели).

5. Используемая в стратегии поиска оптимальных решений имитационная модель предварительно верифицируется. Как для самой модели, так и используемых в эксперименте данных должна быть реализована соответствующая процедура валидации, осуществляемая в соответствии с принятыми в современном имитационном моделировании стандартами [8].

6. В процессе верификации и валидации модели должен быть выбран доверительный интервал моделирования, определены и уточнены границы изменения откликов имитационной модели.

7. Важным моментом является определение с помощью пробных прогонов имитационной модели множества факторов, оказывающих наибольшее влияние на отклики имитационной модели, установление допустимых границ изменения последних и выбор соответствующих уровней для них. Такой подход к реализации имитационных экспериментов позволяет определить по возможности оптимальный набор хромосом-решений в начальной популяции и структуру самих хромосом. При этом значительно уменьшается число прогонов имитационной модели и как следствие время поиска оптимальных решений.

Практический пример. В качестве примера, демонстрирующего возможности разработанной системы оптимизационно-имитационной интеграции рассмотрен 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.

Согласно схеме генетического алгоритма, реализованной в НЕДИС-ОПТИМИЗАТОРЕ, рассматриваемые альтернативы определялись с помощью

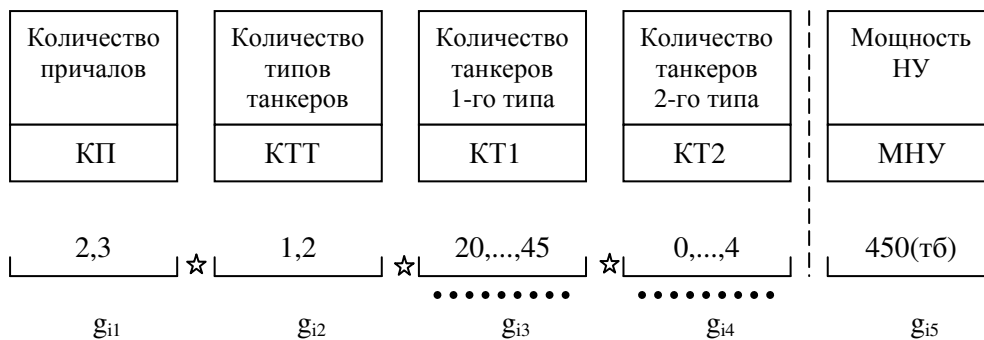


РИС.1. Представление хромосом-решений

хромосом-решений (рис.1), состав и структура которых были установлены на основе анализа результатов тестовых испытаний имитационной модели существующего дока.

Каждая i -я хромосома состоит из пяти генов ($1 \leq j \leq 5, 1 \leq i \leq PopulSize$, где $PopulSize$ – размер популяции, зависящий от числа альтернатив). Для всех генов указаны диапазоны их изменения, а принятый уровень квантования, кроме g_{i5} , равен единице. Звёздочками помечены позиции возможных точек кроссовера. Мутировать могут только гены g_{ij} , представления которых подчеркнуты пунктирной линией.

На рис. 2 представлена формула для определения финансовых затрат на модернизацию порта. Слагаемые первой строки для определения E описывают одноразовые инвестиции в модернизацию порта и приобретения (или аренды) дополнительного числа танкеров, а слагаемые второй строки – возможные потери, которые будет нести порт в процессе эксплуатации его терминала и НУ. Стрел-

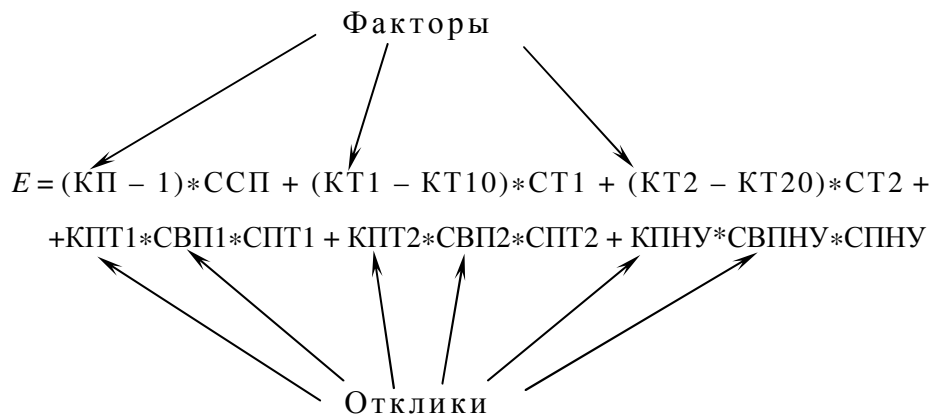


РИС. 2. Представление суммарных затрат на финансирование и поддержку альтернативных проектов модернизации порта
ками указаны факторы и отклики имитационной модели, влияющие на величину финансовых затрат.

На рис. 2 дополнительно к рис. 1 введены следующие обозначения:
 ССП – стоимость сооружения одного причала;
 СТ1, СТ2 – стоимость покупки или аренды одного танкера 1-го или 2-го типа;
 КТ10, КТ20 – количество имеющихся танкеров 1-го и 2-го типа;
 КПТ1, СВП1, СПТ1 – количество простоев, среднее время простоя и стоимость одного часа простоя танкеров 1-го типа соответственно;
 КПТ2, СВП2, СПТ2 – количество простоев, среднее время простоя и стоимость одного часа простоя танкеров 2-го типа соответственно;
 КПНУ, СВПНУ, СПНУ – количество простоев, среднее время простоя и стоимость одного часа простоя нефтеустановки соответственно.

В требуемой для реализации генетического алгоритма процедуре подсчета fitness-значений использовалась формула, определенная на основании выражения для E .

$$\text{fitness} = (КП - 1) * НК1 + (КТ1 - КТ10) * НК2 + (КТ2 - КТ20) * НК3 +$$

$$+ КПТ1 / (КПТ1 + КПТ2) * СВП1 * НК4 + КПТ2 / (КПТ1 + КПТ2) * СВП2 * НК5 +$$

$$+ (КПНУ * СВПНУ) / ВМ * НК6$$

Коэффициенты НК1, ..., НК6 определялись в процессе тестирования и валидации имитационной модели проектируемого дока с учетом данных, касающихся размеров стоимости причалов и танкеров, а также штрафов, которые будет выплачивать порт за простои танкеров соответствующих типов и нефтеустановки. При этом в качестве основного показателя эффективности функционирования терминала было принято время простоя НУ. В результате тестовых прогонов

имитационной модели были выбраны следующие значения коэффициентов: НК1 = 100; НК2 = 4; НК3 = 10; НК4 = 15; НК5 = 30; НК6 = 10000. ВМ – общее время моделирования.

Результаты оптимизационно-имитационных экспериментов представлены в таблице, содержащей элитное подмножество популяции хромосом-решений, сформированное в результате выполнения генетического алгоритма и упорядоченное в соответствии с fitness-значениями. Заметим, что популяция, на базе которой осуществлялся поиск оптимальных проектов модернизации порта, фактически включала 24 хромосомы.

ТАБЛИЦА. Результаты поиска оптимальных проектных решений

№ п/п	Хромосома - решение					Нефте-установка		Танкеры 1-го типа		Танкеры 2-го типа		fitness значение
	КП	КТТ	КТ1	КТ2	МНУ (тб)	КПНУ	СВПНУ (в%)	КП1	СВП1 (часы)	КП2	СВП2 (часы)	
1	3	2	27	5	450	0	0,0	1533	5,37	252	3,93	384,05
2	3	2	33	3	450	0	0,0	1858	5,84	150	3,70	391,34
3	3	2	36	2	450	0	0,0	2022	7,26	99	4,81	414,59
4	3	2	28	5	450	0	0,0	1563	8,04	247	4,47	424,36
5	3	2	39	1	450	0	0,0	2185	7,98	49	4,48	426,07
6	3	1	40	0	450	34	1,06	2279	3,98	0	0	465,91
7	3	2	35	2	450	25	0,8	1966	6,74	102	3,33	489,97
8	3	2	35	2	450	27	0,95	1969	6,6	100	4,32	495,55
9	3	2	35	3	450	0	0,0	1889	15,92	141	10,02	553,05
10	3	2	41	1	450	0	0,0	2182	20,17	46	11,15	617,18

Как следует из таблицы все проектные альтернативы требуют сооружения двух дополнительных причалов. Наиболее перспективным является проект под номером один, поскольку обеспечивает бесперебойную работу нефтеустановки и наименьшие значения среднего времени простоя танкеров обоих типов, что значительным образом сокращает средства на выплату штрафов за простои танкеров. Но при этом требуется приобретение новых 12 танкеров первого типа и 5 танкеров второго типа. Известно, что изначально порт располагает 15 танкерами первого типа. Заслуживает внимания проект под номером шесть, поскольку при сравнительно малых значениях времен простоя танкеров требует закупки только 25 танкеров первого типа.

На основании анализа полученных результатов руководству порта и экспертам предстоит принять решение относительно выбора соответствующей проектной альтернативы в зависимости от размеров инвестиций и наличия соответствующих территорий.

Заключение. Рассмотренный подход к созданию имитационных приложений, ориентированных на поиск оптимальных проектных решений, является

универсальным и может быть использован при исследовании процессов функционирования других типов портов и транспортных систем.

В.А. Пепеляев

ПРО ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЕВРИСТИЧНИХ
СТРАТЕГІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ

Розглядаються особливості застосування базованого на концепціях імітаційно-оптимізаційної інтеграції та метаевристичних стратегій оптимізації підходу до розробки імітаційних застосувань, орієнтованих на пошук оптимальних проектних рішень для дослідження систем.

V.A. Pepeliaev

ABOUT SOME ASPECTS IN USING METAHEURISTIC OPTIMIZATION STRATEGIES

The features of application based on concepts simulation-optimization integration and metaheuristic strategy of optimization of the approach to development of the imitating appendices focused on search of optimal design decisions for systems research.

1. *Fu M.* Optimization for Simulation: Theory and Practice // *INFORMS J. on Computing.* – 2002. – № 14 (3). – P. 192–215.
2. *April J., Glover F., Kelly J.P., Laguna M.* Practical introduction to simulation optimization // *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference.* – 2003. – P. 71–78.
3. *Галаган Т.Н., Гусев В.В., Яценко Н.М.* Реалізація мови розподіленого моделювання систем з дискретними подіями // *Технології розподілених обчислень в імітаційному моделюванні.* – К.: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. – 2001. – С. 15–23.
4. *Пепеляев В.А.* Об эволюционных подходах к оптимизации имитационного моделирования // *Компьютерная математика.* – 2005. – № 1. – С.46–52.
5. *Whitley D.* A Genetic Algorithm Tutorial // *Statistics and Computing.* – 1994. – № 4. – P. 65–85.
6. *Whitley D.* An overview of evolutionary algorithms // *J. of Information and Software Technology.* – 2001. – 43. – P. 817–831.
7. *Бигдан В.Б.* О применении методолого-технологических стандартов в процессах разработки распределённых приложений // *Компьютерная математика.* – 2003. – № 1. – С. 141–153.
8. *Пепеляев В.А., Чёрный Ю.М.* О современных подходах к оценке достоверности имитационных моделей // *Сб. докл. Первой Всерос. науч.-практической конф. ИММОД 2003.* – Санкт-Петербург, 2003. – 1. – С. 138–141.
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 28.03.2005