

# ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАГЕНТНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ И ОПЕРАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

*М.А. Хивинцев,*  
аспирант кафедры бизнес-аналитики, факультет бизнес-информатики,  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

*А.С. Акопов,*  
доктор технических наук, профессор кафедры бизнес-аналитики, факультет  
бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, Москва, Мясницкая ул., 20  
E-mail: mkhivintsev@hse.ru, aakopov@hse.ru

*В статье представлен новый подход к применению многоагентного генетического алгоритма (MAGAMO) для поиска оптимальных стратегических и оперативных решений в имитационных моделях большой размерности.*

*Цель работы – разработка с использованием методов системной динамики имитационной модели типового Интернет-магазина и применение многоагентного генетического алгоритма MAGAMO для решения многокритериальной оптимизационной задачи стратегического и оперативного управления, относящейся к классу задач сверхбольшой размерности. Для реализации математической модели типового Интернет-магазина используется система имитационного моделирования Powersim Studio.*

*Объектом исследования являются многокритериальные оптимизационные задачи большой размерности, реализуемые в системах имитационного моделирования.*

*Для решения подобных задач предложен многоагентный генетический алгоритм MAGAMO. Особенностью данного алгоритма является распределение набора управляющих параметров системы между агентами на основе предварительного кластерного анализа. Каждый агент представляет собой независимый генетический алгоритм с собственной эволюцией решений, соответствующих заданным управляющим параметрам. Информационный обмен между агентами, функционирующими в параллельных процессах, осуществляется через разделяемую память системы (многомерную базу данных). При этом центральный процесс отвечает за отбор решений наивысшего ранга Парето. С использованием специального программного средства ParetoFrontViewer обеспечивается визуализация фронт Парето.*

*Разработанная имитационная модель интегрирована с алгоритмом MAGAMO, системой визуализации границы Парето и многомерной базой данных.*

*В результате проведенных численных экспериментов, осуществленных на реальных данных Интернет-магазина, продемонстрирована высокая эффективность разработанного многоагентного генетического алгоритма для поиска оптимальных решений в системах имитационного моделирования большой размерности.*

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, системная динамика, параллельные генетические алгоритмы, проблема большой размерности, граница Парето.

## Введение

Эффективное стратегическое и оперативное управление сложными организационными структурами обуславливает необходимость решения многокритериальных оптимизационных задач большой размерности. При этом для проектирования интеллектуальных систем управления подобными системами, как правило, используются методы и инструменты имитационного моделирования.

Так, с помощью методов системной динамики [1] – [4], можно описать важнейшие взаимосвязи между финансовыми и материальными потоками крупной компании и исследовать динамику ключевых показателей деятельности (KPI) в зависимости от сценарных условий. Следующим этапом является интеграция имитационной модели предприятия с генетическими оптимизационными алгоритмами для поддержки механизма оптимального управления. Так, например, в работах [5] – [7] описана реализация генетического алгоритма с угасающей селекцией, интегрированного с разработанной имитационной моделью крупной нефтяной компании (ВИНК). В результате решается стратегическая задача максимизации акционерной стоимости ВИНК при различных ограничениях.

Применение генетических алгоритмов в системах имитационного моделирования оправдано невозможностью использования точных аналитических методов градиентного типа. Значение целевой функции является результатом «прогона» имитационной модели.

Однако, с ростом размерности задачи и количества исходных данных эффективность известных генетических алгоритмов (ГА) существенно падает, так как для работы ГА требуется многократный пересчет фитнес-функции, основанный на соответствующих «прогонах» имитационной модели предприятия. При этом, время «прогона» имитационной модели сверхбольшой размерности даже с использованием суперкомпьютерных технологий, как правило, велико (исчисляется минутами). Поэтому для подобных систем наблюдается экспоненциальный рост вычислительной сложности с увеличением числа размерностей оптимизационной задачи.

Поэтому был разработан многоагентный генетический алгоритм для многоцелевой оптимизации (MAGAMO), описанный в работе [8]. Данный алгоритм использует в своей основе принципы

известного генетического алгоритма SPEA2 [9], параллельные вычисления для оценки значений фитнес-функций и приспособленности популяции [10] и др. Вместе с тем, имеется существенное отличие MAGAMO от известных параллельных ГА, в том числе от так называемой «островной» модели ГА [11], заключающееся в том, что в MAGAMO имеются интеллектуальные агенты, представляющие собой независимые ГА (исполнимые на отдельных вычислительных кластерах или в потоках), между которыми осуществляется распределение пространства искомых переменных. При этом центральный процесс отвечает за отбор решений наивысшего ранга Парето и формирование границы Парето.

В настоящей статье рассмотрен пример применения MAGAMO для решения многокритериальной оптимизационной задачи в разработанной имитационной модели типового Интернет-магазина, относящейся к классу задач сверхбольшой размерности. Для реализации математической модели типового Интернет-магазина используется система имитационного моделирования PowersimStudio. Для формирования множества Парето-оптимальных решений применяется генетический алгоритм MAGAMO. Для визуализации границы Парето используется основанный на методах аппроксимации программный продукт ParetoFrontViewer, разработанный в ВЦ РАН [12].

### 1. Многокритериальная оптимизационная задача типового Интернет-магазина

С использованием методов системной динамики разработана типовая (референтная) имитационная модель для крупного Интернет-магазина.

Рассматриваемая условная компания осуществляет дистанционную торговлю несколькими товарными категориями в различных регионах (городах). Следует отметить, что компания является дистрибьютором готовой продукции, т.е. в имитационной модели предприятия нет производственной составляющей.

Разработанная модель предназначена для поддержки принятия решений по динамическому управлению ассортиментом, ценообразованием, качеством обслуживания, оборачиваемостью запасов, маркетинговой активностью, расходами, географическим покрытием (присутствием в регионах

и т.д.). При этом поиск оптимальных управленческих решений должен осуществляться в разрезе регионов, товарных категорий, сегментов потребительских предпочтений и др.

Следует отметить, что в модели выделяются следующие *оперативные управляющие параметры*, оптимальные значения которых формируются весьма часто (в частности, еженедельно):

- ◆ уровень цен на товарные категории;
- ◆ комиссия с 1 заказа за доставку по регионам;
- ◆ интенсивность маркетинговой активности.

В модели имеются *стратегические управляющие параметры*, оптимальные значения которых формируются довольно редко (в частности, по годам):

- ◇ коэффициент маркетинговой активности по регионам;
- ◇ коэффициент маркетинговой активности по категориям товаров;
- ◇ коэффициент маркетинговой активности по сегментам потребительских предпочтений;
- ◇ качество обработки заказа (обслуживания);
- ◇ доступность товаров на складе по товарным категориям.

Основная задача торгового предприятия заключается в поиске оптимальных значений стратегических и оперативных решений, обеспечивающих сбалансированное динамическое развитие компании. В частности, выбраны следующие целевые показатели:

- накопленная EBITDA (прибыль до вычета расходов по уплате налогов, процентов по кредиту и начисленной амортизации);
- размер активной клиентской базы (количество клиентов, совершивших хотя бы одну покупку за предшествующие 12 месяцев);
- средняя оборачиваемость товарных запасов.

Для решения оптимизационной задачи требуется максимизировать на конец периода моделирования накопленную EBITDA и размер активной клиентской базы, минимизировав при этом среднюю за периоды моделирования оборачиваемость товарных запасов. Эти цели являются стратегически важными для типового Интернет-магазина, при этом они являются конкурентными (например, рост клиентской базы за счет снижения цен приводит к уменьшению прибыли). При этом важность каждой из целей не поддается весовой оценке, так как имеется

актуальная задача максимально возможного приближения к достижению каждой из них. Поэтому необходимо нахождение Парето-оптимальных решений и построение Парето-фронта (т.е. искомые управленческие решения *должны лежать на границе множества Парето*).

Следует отметить, что в каждый момент быстрого времени должны выполняться стратегические ограничения, имеющие понятный экономический смысл:

- при определении ценовой политики средняя маржинальность продаж каждой товарной категории в каждом периоде должна быть в диапазоне от заданного минимального уровня маржи до максимально допустимого;

- стоимость доставки в каждом периоде должна составлять от 0 до максимального заданного уровня в процентах от стоимости товара;

- качество обслуживания должно быть более 0 и меньше либо равно максимально допустимому уровню;

- доступность товаров на складе по каждой категории должно быть от минимально допустимого уровня до 100%;

- интенсивность маркетинговой активности в каждом периоде должна быть от 0 до максимально допустимого уровня;

- сумма коэффициентов маркетинговой активности по регионам, категориям, сегментам потребительских предпочтений равна 1;

- оборачиваемость запасов в каждом периоде не должна превышать заданный максимальный уровень в днях;

- доля рынка в количественном выражении в каждом периоде на каждом региональном уровне должна быть не ниже минимального уровня;

- доля рынка в количественном выражении в каждом периоде по каждой категории должна быть не ниже минимального уровня.

Разработка модели осуществлялась с использованием методов системной динамики. Была выполнена исследовательская работа по объекту моделирования – проведен маркетинговый анализ рынка и выявлены различные зависимости, что позволило основать прогноз продаж на коэффициенте трансформации активной клиентской базы (готовность лояльных клиентов к совершению повторной покупки) и суммарной емкости рынка, а также выделить влияние различных

факторов на вероятность покупки в конкретном Интернет-магазине для каждого из трех сегментов потребительских предпочтений. К первому сегменту относятся экономные клиенты, которым важна цена и они реагируют на рекламу. Во второй сегмент вошли клиенты, активно реагирующие на рекламу – ее имиджевую составляющую – и повышенное требование они, как правило, предъявляют к качеству (надежности). В третий сегмент попали наиболее рациональные клиенты, которые ищут выгодную цену и хорошее качество (надежность), стараясь игнорировать рекламу.

Факторами, влияющими на вероятность покупки, являются: общий размер клиентской базы, потребительская активность периода (сезонность), сила конкуренции, разница между установленной итоговой ценой товара (с учетом комиссии за доставку) и среднерыночной ценой, лояльность к другим Интернет-магазинам (фактор естественной конкуренции), накопленный имидж магазина, накопленное маркетинговое покрытие, доступность товаров на складе. Для каждого из сегментов потребительских предпочтений эти факторы имеют разную силу воздействия на вероятность покупки. Перечисленные факторы входят в экспоненциальное уравнение логистической регрессии, при помощи которого вычисляется вероятность совершения покупки различными группами клиентов.

Кроме того, данные факторы имеют различное воздействие на клиентов, совершавших покупку в данном магазине и не совершавших. Поэтому прогноз спроса строится отдельно для повторных клиентов (имевших хотя бы одну покупку за последний год, составляющих активную клиентскую базу) и новых клиентов.

Для повторных клиентов прогноз спроса строится на основе коэффициентов трансформации клиентской базы, предварительно разбитой по периодам совершения клиентами своей последней покупки, в число намеревающихся совершить в данном периоде очередную покупку. На окончательное их решение о покупке влияют перечисленные выше факторы, но с другими коэффициентами, отличными от применяемых для новых клиентов, ввиду уже однажды проявленной лояльности к магазину. К тому же, добавляется в расчет фактор качества обслуживания при их последней покупке.

Для новых клиентов прогноз спроса основан на определении максимального потенциала роста клиентской базы (емкость рынка за вычетом имеющихся человек в клиентской базе) в каждом периоде и доли рынка, которую удастся получить благодаря определяющим вероятность покупки факторам.

В модели присутствуют нелинейные зависимости, зависимости переменных от их значения в прошлом периоде, стохастические функции, присваивание значений переменным массива в циклах. Так, например, прогнозирование изменений накопленного маркетингового покрытия и имиджа осуществлено через подход дисконтирования, согласно которому значение прошлого периода учитывается с определенным дисконтом в новом периоде. Перечисленные особенности модели делают невозможным представление целевых функций в аналитическом виде, что приводит к неприменимости классических методов (основанных на вычислении производных функции) для решения данной оптимизационной задачи.

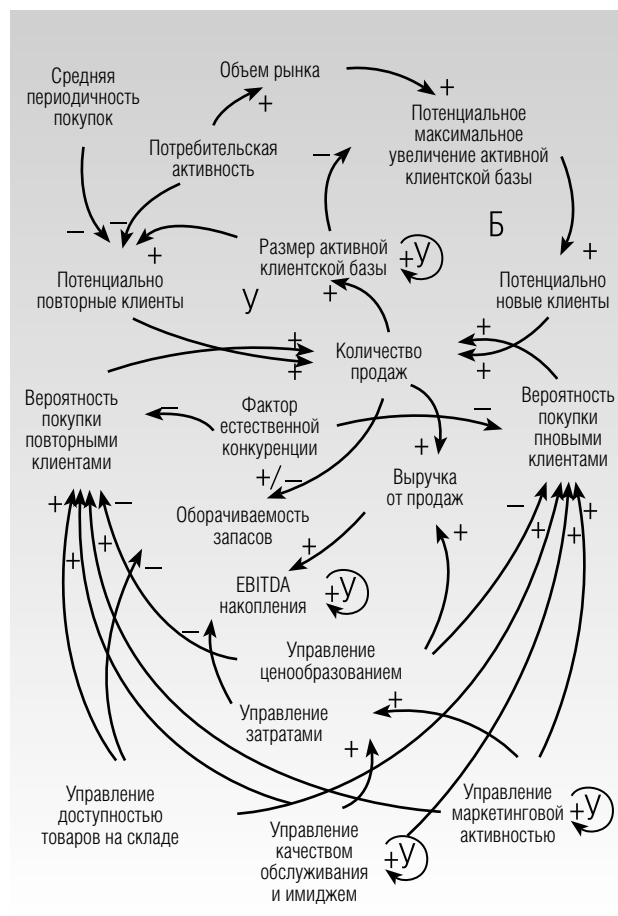


Рис. 1. Диаграмма причинно-следственных связей

В качестве горизонта моделирования рассматривается один год, а шаг моделирования равен 1 неделе (итого 52 недели, 52 шага). Неделя является наилучшим периодом для принятия и оценки оперативных управленческих решений при управлении Интернет-магазином. Горизонт моделирования может быть продлен на несколько лет.

На *рис. 1* представлена диаграмма, демонстрирующая причинно-следственные связи модели.

Введем следующие обозначения:

**Индексы, используемые в модели:**

$t = t_0, t_0 + 1, \dots, T$  – индекс периода (быстрое время: 1 период = 1 неделя),  $T$  – горизонт планирования (52 недели  $\approx$  год);

$i = 1, 2, \dots, I$  – индекс регионов (городов);

$j = 1, 2, \dots, J$  – индекс товарных категорий;

$k = 1, 2, \dots, K$  – индекс сегментов потребительских предпочтений;

$w = 1, 2, \dots, W$  – индекс периода последней покупки (номера недели).

**Экзогенные переменные:**

$s_j(t)$  – сезонная потребительская активность данного периода по  $j$ -ым товарным категориям (%);

$v_{i,k,j}$  – исходный объем рынка по  $i$ -ым регионам,  $k$ -ым сегментам потребительских предпочтений,  $j$ -ым товарным категориям (шт);

$cb_{i,k,w}$  – исходная клиентская база, сегментированная по  $i$ -ым регионам,  $k$ -ым сегментам потребительских предпочтений,  $w$ -ым периодам последней покупки (чел);

$r_w(t)$  – степень готовности повторных клиентов, разделенных по периодам последней покупки, к следующей покупке (%);

$av$  – среднее число покупок клиентами за период;

$\varepsilon_{k,j}$  – базовая эластичность по цене по  $k$ -ым сегментам потребительских предпочтений и  $j$ -ым категориям;

$l_i$  – длительность исполнения заказа по  $i$ -ым регионам (дней);

$\sigma_j$  – длительность оборачиваемости товарных запасов по  $j$ -ым категориям (дней);

$ab_j$  – уровень базовой доступности товаров на складе по категориям (%);

$b$  – коэффициент нелинейного роста длительности оборачиваемости склада при повышении доступности товаров на складе.

$\beta_j$  – доля возвратов после продажи по  $j$ -ым категориям товаров (%);

$u$  – доля неликвидного в возвратном потоке товаров (%);

$cp_j$  – исходная средняя себестоимость товаров по  $j$ -ым категориям (руб);

$DC_i$  – расходы на доставку 1 кг в  $i$ -ый регион (руб/кг);

$Wt_j$  – средний вес товара в  $j$ -ой категории (кг);

$mb$  – базовый маркетинговый бюджет (руб);

$oc_0, oc_1, oc_2$  – коэффициенты, используемые для определения функции операционных расходов на обработку 1 заказа ( $oc_0, oc_1$  – руб);

$mc_0, mc_1, mc_2$  – коэффициенты, используемые для определения функции управленческих расходов ( $mc_0, mc_1$  – руб);

$c$  – уровень комиссии за прием платежей (%).

**Стратегические управляющие параметры модели:**

$q$  – уровень качества обработки заказов;

$a_j$  – доступность товаров на складе по товарным категориям (%);

$m1_i$  – маркетинговая активность по  $i$ -ым регионам (%);

$m2_j$  – маркетинговая активность по  $j$ -ым товарным категориям (%);

$m3_k$  – маркетинговая активность по  $k$ -ым сегментам потребительских предпочтений (%).

**Оперативные управляющие параметры модели:**

$p_j(t)$  – средние цены на  $j$ -ые товарные категории в период времени  $t$  (руб);

$d_i(t)$  – соотношение стоимости доставки к стоимости товаров в  $i$ -ых регионах в период времени  $t$  (%);

$m(t)$  – коэффициент интенсивности маркетинговой активности в период времени  $t$ .

**Динамика основных показателей модели**

**(эндогенных переменных) в момент времени  $t$ .**

Суммарный объем рынка:

$$V_{i,k,j}(t) = v_{i,k,j} \cdot ss_j(t), \quad (1)$$

где  $ss_j(t)$  – это накопленная потребительская активность:

$$ss_j(t) = \begin{cases} 1, & t = t_0 \\ ss_j(t-1) \cdot (1 + s_j(t)), & t > t_0. \end{cases} \quad (2)$$

Число клиентов в активной клиентской базе:

$$CB_{i,k,w}(t) = \begin{cases} cb_{i,k,w}, & t = t_0 \\ \frac{Q_{ij}(t)}{av}, & t > t_0 \text{ и } w = 1, \\ CB_{i,k,w}(t-1), & t > t_0 \text{ и } w > 1 \end{cases} \quad (3)$$

где  $Q_{i,j}(t)$  обозначает динамику продаж в штуках и будет определено ниже.

Максимальный потенциал продаж повторным (лояльным) клиентам:

$$N_{i,k,w,j}^{(нов)}(t) = CB_{i,k,w} \cdot r_w(t) \cdot ss_j(t) \cdot av. \quad (4)$$

Максимальный потенциал продаж новым клиентам:

$$N_{i,k,j}^{(нов)}(t) = V_{i,k,j}(t) - \sum_{w=1}^W N_{i,k,w,j}^{(нов)}(t). \quad (5)$$

Вероятность покупки повторными клиентами:

$$Pb_{i,k,w,j}^{(нов)}(t) = \frac{1}{1 + e^{-z_{i,k,w,j}^{(нов)}(t)}}, \quad (6)$$

где  $z_{i,k,w,j}^{(нов)}(t)$  определяется суммой факторов, оказывающих влияние на спрос для повторных клиентов (конкуренции, цены, доступности товаров, имиджа, маркетинга, качества оказанного обслуживания в прошлый раз).

Вероятность покупки новыми клиентами:

$$Pb_{i,k,j}^{(нов)}(t) = \frac{1}{1 + e^{-z_{i,k,j}^{(нов)}(t)}} \quad (7)$$

где  $z_{i,k,w,j}^{(нов)}(t)$  определяется суммой факторов, оказывающих влияние на спрос для новых клиентов (конкуренции, цены, доступности товаров, имиджа, маркетинга).

Так, например, фактор влияния цены вычисляется через отклонение установленной итоговой цены на товар ( $p_j(t)$  с учетом цены за доставку  $d_j(t)$ ) от среднерыночной с использованием подхода, основанном на эластичности. При этом коэффициент эластичности ( $\varepsilon_{k,j}$ ), в свою очередь, имеет степенную зависимость от отклонения от среднерыночной цены. А динамика среднерыночной цены определяется инфляцией ( $inf_j(t)$ ) «прогнозом уровня конкуренции» и случайным отклонением, заданным через нормальное распределение.

Динамика объема продаж в штуках:

$$Q_{ij}(t) = \sum_{k=1}^K (N_{i,k,j}^{(нов)}(t) \cdot Pb_{i,k,j}^{(нов)}(t)) + \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W (N_{i,k,w,j}^{(нов)}(t) \cdot Pb_{i,k,w,j}^{(нов)}(t)). \quad (8)$$

Динамика объема продаж в деньгах:

$$G(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (Q_{i,j}(t) \cdot P_{i,j}(t)). \quad (9)$$

Динамика себестоимости в денежном выражении:

$$CP_j(t) = \left( \sum_{i=1}^I Q_{i,j}(t) \right) \cdot cp_j \cdot PI_j(t). \quad (10)$$

где  $PI_j(t)$  – это накопленный индекс цен по товарным категориям, который меняется каждый период под воздействием инфляции, конкуренции и сезонного регулирования среднерыночных цен.

Динамика общих расходов:

$$E(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \{ CP_j(t) \cdot (1 + \beta_j \cdot u) + Q_{i,j}(t) \cdot (OC + DC_i \cdot Wt_i) \} + G(t) \cdot c + MB(t) + MC(t) \quad (11)$$

где  $OC = oc_0 + oc_1 \cdot e^{oc_2 \cdot q}$  – норма операционных затрат на 1 заказ;

$MB(t) = mb \cdot m(t)$  – маркетинговый бюджет данного периода;

$MC(t) = \text{MAX}(mc_0 + mc_1 \cdot \ln((Q_{i,j}(t))^{mc_2}); MC(t-1) \cdot 0,9)$  – зависимость управленческих расходов от объема продаж в штуках, причем они не могут более чем на 10% ниже, чем в прошлом периоде.

**Средневзвешенный срок исполнения заказов:**

$$L1(t) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \{ CP_j(t) \cdot l_j / (1 - \beta_j) \}}{\sum_{j=1}^J CP_j(t)}. \quad (12)$$

**Средняя оборачиваемость складских запасов:**

$$L2(t) = \frac{\sum_{j=1}^J \{ CP_j(t) \cdot \sigma_j \cdot (a_j / ab_j)^b \}}{\sum_{j=1}^J CP_j(t)}. \quad (13)$$

**Накопленная прибыль (EBITDA) рассчитывается по формуле:**

$$EBITDA = \sum_{t=t_0}^T (G(t) - E(t)). \quad (14)$$

**Размер активной клиентской базы рассчитывается по формуле:**

$$CBSUM(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W CB_{i,k,w}(t). \quad (15)$$

**Динамика средней оборачиваемости запасов в течение периода моделирования рассчитывается по формуле:**

$$\bar{L} = \left\{ \sum_{t=t_0}^T (L1(t) + L2(t)) \right\} / T. \quad (16)$$

Далее можно сформулировать задачу поиска оптимального стратегического и оперативного управления для типового Интернет-магазина.

**Задача 1.**

Необходимо вычислить оптимальные значения набора оперативных и стратегических управляющих параметров  $\{q, a, m1_i, m2_j, m3_k, p_j(t), d_i(t), m(t)\}$ , обеспечивающих максимальные значения прибыли и размера

клиентской базы при минимальном времени оборачиваемости запасов:

$$\begin{cases} \max_{\{q, a, m_1, m_2, m_3, p_i(t), d_i(t), m(t)\}} \{EBITDA\} \\ \max_{\{q, a, m_1, m_2, m_3, p_i(t), d_i(t), m(t)\}} \{CB(t)\} \\ \min_{\{q, a, m_1, m_2, m_3, p_i(t), d_i(t), m(t)\}} \{\bar{L}\} \end{cases} \quad (17)$$

при выполнении следующих ограничений в каждый момент времени  $t$ :

ограничение на уровень маржинальности

$$M_j^{min} < \frac{p_j(t)}{cp_j \cdot PI_j(t)} - 1 \leq M_j^{max}, \quad (18)$$

ограничения на долю рынка по городам

$$MS1_j^{min} \leq \sum_{i=1}^I Q_{i,j}(t) / \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K V_{i,k,j}(t), \quad (19)$$

ограничения на долю рынка по товарным категориям

$$MS2_i^{min} \leq \frac{\sum_{j=1}^J Q_{i,j}(t)}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J V_{i,k,j}(t)}, \quad (20)$$

ограничения на скорость оборачиваемости и пр.

$$L1(t) + L2(t) \leq L^{max}. \quad (21)$$

В рассматриваемой модели, содержащей 5 товарных категорий, 6 городов, 3 клиентских сегмента, 52 недели, 3 целевых функции, с учетом ограничений, размерность решений достигает примерно 380000, что характеризует размерность задачи как сверхбольшую.

## 2. Многоагентный генетический алгоритм MAGAMO

Для эффективного решения многокритериальной оптимизационной задачи сверхбольшой размерности был разработан многоагентный генетический алгоритм MAGAMO [8]. В его основе лежит динамическое взаимодействие синхронизированных интеллектуальных агентов, каждый из которых выполняет свой эволюционный генетический алгоритм по методу SPEA2. При этом каждый агент имеет собственную фитнес-функцию, содержащую свой набор переменных. Следовательно, каждый агент занят поиском собственных субоптимальных решений. Как только агент находит субоптимальное решение, он обменивается лучшим генетическим материалом с другими агентами. В то же время, агенты активны и они могут инициировать обмен в случае необходимости (когда цель улучшена). Это способствует улучшению разделенных эволюционных процессов соединенных агентов. В результате во всей системе происходит нахождение глобальных Парето-оптимальных решений.

Преимущества MAGAMO в задачах сверхбольшой размерности достигается благодаря снижению количества расчетов фитнес-функций, что, в свою очередь, происходит за счет снижения размерности пространства решений для каждого из агентов и, как следствие, снижения требований к количеству особей и расчетов фитнес-функций в результате их скрещивания.

### Входные параметры алгоритма:

$\bar{N}$  – набор решений

$\bar{N}_j$  – архивный размер  $j$ -агента ( $j = 1, 2, \dots, J$ ).

$P_{q,j}$  – популяция  $j$ -агента на  $q$ -итерации.

$Q$  – максимальное число итераций эволюции агентов

$\bar{P}_{q,j}$  – архивы агентов с недоминируемыми особями на  $q$ -итерации ( $P_{0,j}$ )

### Выходные значения алгоритма:

$A$  – набор недоминируемых решений.

Функционал алгоритма MAGAMO может быть описан в следующем виде:

**Шаг 1 – Статистический анализ задачи:** проведение исследования целевых функций и кластеризация всех решений для формирования фитнес-функций для каждого агента. Распределение управляющих переменных между агентами.

**Шаг 2 – Инициализация:** инициализация набора решений и распределение их по  $n$ -размерностям между агентами. Создание исходной популяции для каждого  $j$ -агента и создание пустых архивов. Установка  $q = 0$ .

**Шаг 3. Запуск основного процесса и выбор агентов:** копирование всех недоминируемых решений, сформированных агентами и сохранённых в разделяемой памяти (базе данных) наилучших особей из  $\bar{P}_{q,j}$  в  $\bar{P}_{q+1,j}$ . Если размер  $\bar{P}_{q+1,j}$  достигает  $\bar{N}_j$ , тогда снижается посредством оператора усечения. Иначе, если размер  $\bar{P}_{q+1,j}$  меньше, чем  $\bar{N}_j$ , то происходит заполнение  $\bar{P}_{q+1,j}$  доминируемыми особями  $P_{q,j}$ .

**Шаг 4. Запуск  $j$ -агентов в потоках:** запуск модели в PowerSimStudio с набором лучших особей, который переходят между агентами для оценки целевых функций. Происходит движение вперед на шаг эволюции агентов для формирования лучших особей агентом  $q_j = q_j + 1$ . Эволюция агентов основана на операторах кроссовера и мутации. Периодически (раз в несколько итераций) осуществляется сохранение наилучших особей в разделяемую память системы (базу данных).

**Шаг 5. Завершение:** если  $q_j \geq Q$  или достигаются другие критерии останова, тогда множество  $A$  – это набор решений в виде вектора, состоящий из недоминируемых решений в  $\bar{P}_{q+1,j}$ . Завершение работы алгоритма.

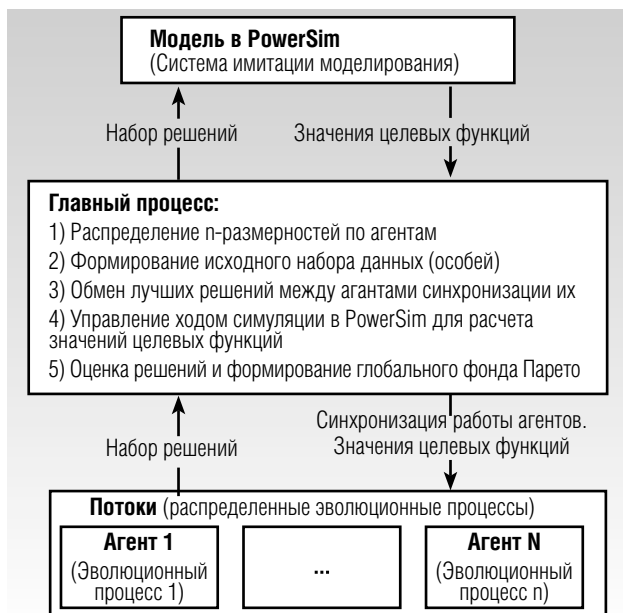


Рис. 2. Архитектура системы

Программное приложение для управления распределенной системой агентов согласно принципу MAGAMO было разработано в Microsoft Visual Studio 2012 на языке программирования C#. Оно также было интегрировано с использованием библиотеки SDK со средством имитационного моделирования PowerSim Studio, в котором была построена описанная референтная модель типового Интернет-магазина.

Архитектура разработанного программного комплекса представлена на рис. 2.

### 3. Построение и визуализация границы Парето

Для демонстрационного решения поставленной оптимизационной задачи на основе MAGAMO была создана распределенная система, состоящая из центрального процесса и 4 агентов. Исходное распределение пространства решений по агентам представлено на табл. 1.

Таблица 1.

Распределение пространства решений между агентами

	Пространство решений
Агент 1	$q, m1_{i/2}, m2_{j/2}, m3_{k/2}, m(t)$
Агент 2	$q, m1_{i/2}, m2_{j/2}, m3_{k/2}, m(t)$
Агент 3	$a_{j/2}, p_{j/2}(t), d_{i/2}(t)$
Агент 4	$a_{j/2}, p_{j/2}(t), d_{i/2}(t)$

В результате работы системы на приближенных к реальности тестовых данных были найдены 3 тысячи Парето-оптимальных решений за 2,5 часа. Каждое решение приводит к комбинации из значений 3 целевых функций. Эти комбинации были экспортированы в специальный программный продукт Pareto Front Viewer, разработанный в ВЦ РАН [12], что позволило графически изобразить фронт Парето (рис. 3).

Для визуализации границы Парето выбрано представление на плоскости с использованием цветовой шкалы для третьего показателя: ось Oх – накопленная EBITDA в тыс. руб., ось Oy – размер активной клиентской базы в тыс. чел., ось Oz – средняя оборачиваемость товарных запасов в днях. График представлен на рис. 3.

Диапазон светлого цвета содержит решения, которые позволяют достичь относительно низких показателей накопленной прибыли и размера клиентской базы при минимальной оборачиваемости запасов. Диапазон черного цвета, напротив, позволяет добиться одновременного увеличения первых двух целевых показателей и ухудшение третьего. Решение оптимизационной задачи и визуализация границы Парето позволяет выбрать решение, исходя из выбранной стратегии, которая, в качестве примера, может заключаться в балансировке всех целевых показателей (сценарий 1 на рис. 3) или в максимизации прибыли при минимально допустимом размере клиентской базы на уровне 1,28 млн. человек и при оборачиваемости запасов не более 32 дней (сценарий 2 на рис. 3).

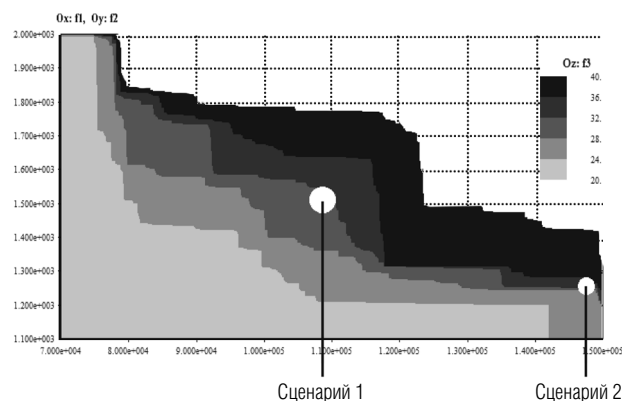


Рис. 3. Визуализация границы Парето в Pareto Front Viewer

Для демонстрационного примера анализ границы Парето позволяет также сделать вывод, что добиться максимальной клиентской базы можно при различном уровне оборачиваемости запасов, но прибыль по всем случаям будет предельно низкой.



### Заключение

С использованием методов системной динамики разработана и описана имитационная модель типового Интернет-магазина. Выполнена реализация имитационной модели в системе имитационного моделирования PowerSim Studio. Сформулирована задача оптимального стратегического и оперативного управления, относящаяся к классу многокритериальных оптимизационных задач сверхбольшой размерности.

Осуществлен поиск Парето-оптимальных решений с использованием разработанного многоагентного генетического алгоритма (MAGAMO). Особенностью данного алгоритма является распределение набора управляющих параметров системы между агентами на основе предварительного кластерного анализа. Информационный обмен между

агентами, функционирующими в параллельных процессах, осуществляется через разделяемую память системы (многомерную базу данных). При этом центральный процесс отвечает за отбор решений наивысшего ранга Парето. С использованием специального программного средства Pareto Front Viewer визуализирован фронт Парето.

Разработан программный комплекс, представляющий собой информационно-аналитическую систему поддержки принятия стратегических и оперативных решений, в рамках которой, реализована интеграция системы имитационного моделирования PowersimStudio с многомерным информационным хранилищем и многоагентным генетическим алгоритмом (MAGAMO). Экспериментально показана высокая эффективность разработанной системы для решения многокритериальных оптимизационных задач большой размерности. ■

### Литература

1. Forrester J.W. Industrial Dynamics. MIT Press, 1961.
2. Sterman J. Business Dynamics. Irwin McGraw-Hill, 2000. 982pp.
3. Горбунов А.Р. Управление финансовыми потоками. Проект «сборка холдинга». М.: Глобус, 2005. 224 с.
4. Исаев Д.В. Мониторинг и планирование развития систем информационной поддержки корпоративного управления и стратегического менеджмента // Бизнес-информатика. 2012. № 3 (21). С. 63-69.
5. Akopov A.S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // International Journal of Computer Applications in Technology. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 220-230.
6. Акопов А.С. К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Ч.2. Программная реализация системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 47-54.
7. Акопов А.С. К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Ч.1. Математическое обеспечение системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании // Проблемы управления. 2010. № 6. С. 12-18.
8. Akopov A.S., Hevencev M.A. A Multi-agent genetic algorithm for multi-objective optimization // Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Manchester, UK, October 13-16, 2013. IEEE, 2013. P. 1391-1396.
9. Bleuer S., Brack M., Thiele L., Zitzler E. Multiobjective genetic programming: Reducing bloat by using SPEA 2 // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (CES-2001). Seoul, Korea, May 27-30, 2001. P. 536-543.
10. Хивинцев М.А., Акопов А.С. Распределенная эволюционная сеть для решения многокритериальных оптимизационных задач в системах имитационного моделирования // Бизнес-информатика. 2013. № 3(25). С. 35-41.
11. Gordon V.S., Whitley D., Bohn A. Dataflow parallelism in genetic algorithms // Parallel Problem Solving from Nature, Amsterdam: Elsevier Science. 1992. No.2. P.533-542.
12. Pareto Front Viewer. <http://www.ccas.ru/mmes/mmeda/soft/third.htm> (date of access 01.01.2014).

# APPLICATION OF MULTI-AGENT GENETIC ALGORITHM FOR SEARCH OF OPTIMUM STRATEGIC AND OPERATIONAL DECISIONS

**Maxim KHIVINTCEV,**

Post-Graduate Student, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics,  
National Research University Higher School of Economics

**Andranik AKOPOV,**

Professor, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics,  
National Research University Higher School of Economics

Address: 20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russian Federation

E-mail: mkhivintsev@hse.ru, aakopov@hse.ru

The article presents a new approach to applying a multi-agent genetic algorithm (MAGAMO) for search of optimum strategic and operational solutions in large-scale simulation models.

The purpose of the paper is to develop a simulation model of a referential Internet shop on the basis of the system dynamics methods and to apply the multi-agent genetic algorithm (MAGAMO) for solution a multi-criteria optimizing problem of the strategic and operational control parameters related to the class of large-scale problems. An imitation modeling system Powersim Studio is used for implementing the mathematical model of referential internet shop.

The research is focused on the large-scale multi-criteria optimizing problems run in simulation systems.

For the solution of such problems, a multi-agent genetic algorithm (MAGAMO) is offered. The feature of this algorithm is the distribution of a set of the system operating parameters

between agents on the basis of the preliminary cluster analysis. Each agent represents independent genetic algorithm with its own evolution of the decisions, corresponding to the preset control parameters. Information exchange between the agents functioning in parallel processes is carried out through divided memory of system (a multidimensional database). Here, the central process is responsible for selecting solutions of the highest rank of Pareto. Using a specialized software of Pareto Front Viewer visualization, Pareto's front is provided.

The developed simulation model is integrated with algorithm of MAGAMO, system of visualization of Pareto front and a multidimensional database.

The results of numerical experiments, which have been carried out on real data of the internet shop, have demonstrated high efficiency of the developed multi-agent genetic algorithm for search of optimum solutions in systems of imitating modeling of big dimension.

**Key words:** multicriteria optimization, system dynamics, parallel genetic algorithms, large-scale problem, Pareto front.

## References

1. Forrester J.W. (1961) *Industrial Dynamics*. MIT Press.
2. Sterman J. (2000) *Business Dynamics*. Irwin McGraw-Hill.
3. Gorbunov A.R. (2005) *Upravlenie finansovymi potokami. Proekt «sorkaholdinga»* [Management of financial streams. «Holding assembly» project]. Moscow: Globus. (in Russian)
4. Isaev D.V. (2012) Monitoring i planirovanie razvitiya sistem informacionnoj podderzhki korporativnogo upravleniya i strategicheskogo menedzhmenta [Monitoring and planning of development of information support systems for corporate governance and strategic management]. *Business informatics*, no. 3 (21), pp. 63-69. (in Russian)
5. Akopov A.S. (2012) Designing of Integrated System-dynamics Models for an Oil Company. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 220-230.
6. Akopov A.S. (2011) K voprosu proektirovaniya intellektual'nyh sistem upravleniya slozhnymi organizacionnymi strukturami. Ch.2. Programmnaya realizacija sistemy upravleniya investicionnoj dejatel'nost'ju vertikal'no-integrirovannoj neftjanoy kompanii [On the issue of developing of intelligent control systems of complex organizational structures. Part 2. Software support for control system of the vertically integrated oil company investment activities]. *Problemy Upravleniya*, no. 1, pp. 47-54. (in Russian)
7. Akopov A.S. (2010) K voprosu proektirovaniya intellektual'nyh sistem upravleniya slozhnymi organizacionnymi strukturami. Ch.1. Matematicheskoe obespechenie sistem ypravleniya investicionnoj dejatel'nost'ju vertikal'no-integrirovannoj neftjanoy kompanii [On the issue of developing of intelligent control systems of complex organizational structures. Part 1. Mathematical support for control system of the vertically Integrated oil company investment activities]. *Problemy Upravleniya*, no. 6, pp. 12-18. (in Russian)

8. Akopov A.S., Hevencev M.A. (2013) A Multi-agent Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Manchester, UK, October 13-16, 2013. IEEE, pp. 1391-1396.
9. Bleuer S., Brack M., Thiele L., Zitzler E. (2001) Multiobjective genetic programming: Reducing bloat by using SPEA 2. Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (CES-2001). Seoul, Korea, May 27-30, 2001, pp. 536-543.
10. Hivintsev M.A., Akopov A.S. (2013) Raspredeleonnaja jevoljucionnaja set' dlja reshenija mnogokriterial'nyh optimizacionnyh zadach v sistemah imitacionnogo modelirovanija [Distributed evolutionary network for the solving of multi-criteria optimization problems in simulation systems]. *Business Informatics*, no. 3(25), pp. 35-41. (in Russian)
11. Gordon V.S., Whitley D., Bohn A. (1992) Dataflow parallelism in genetic algorithms. *Parallel Problem Solving from Nature, Amsterdam: Elsevier Science*, no.2, pp. 533-542.
12. Pareto Front Viewer. <http://www.ccas.ru/mmes/mmeda/soft/third.htm> (date of access 01.01.2014).