

На правах рукописи

Шахназарян Армен Авинерович

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТОРГОВЫХ  
СИСТЕМ НА РЫНКЕ ЦЕННЫХ БУМАГ**

Специальность 05.13.10. «Управление в социальных и  
экономических системах»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2006

Работа выполнена на кафедре автоматизированных систем управления в Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете).

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор

Рыков Александр Семенович

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор

Новиков Дмитрий Александрович;

– доктор технических наук, профессор

Елисов Лев Николаевич

Ведущее предприятие: Институт системного анализа РАН

Защита диссертации состоится 6 октября 2006 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.212.132.10 в Исследовательском центре проблем качества подготовки специалистов Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета) по адресу: 105318, г. Москва, Измайловское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Исследовательского центра.

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

И.Б. Моргунов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Вместе с развитием в нашей стране рыночных отношений постепенно повышается роль финансовой системы в целом и рынка ценных бумаг в частности в задаче аккумуляции, накопления и перераспределения денежных средств между различными субъектами экономических отношений.

Современная инфраструктура рынка ценных бумаг, включающая в себя: электронные торговые системы; мгновенные расчеты по заключенным сделкам; прозрачность и доступность рыночных данных; законодательное регулирование, направленное на защиту интересов частных инвесторов – в значительной степени повлияли на изменения в структуре основных участников рынка ценных бумаг. Если еще 5-7 лет назад основными участниками были государство, крупные инвестиционные компании и банки, то сегодня значительную часть составляют средние и мелкие отечественные и иностранные инвесторы, вкладывающие собственные средства в доступные финансовые активы (акции, облигации, валюты, производные инструменты и т.д.).

Такое качественное изменение структуры участников рынка в определенной степени повлияло и на характер развития самого рынка. Так, можно утверждать, что за последние годы российский фондовый рынок стал, с одной стороны, более ликвидным, более высокодоходным, однако, с другой стороны, более чувствительным к внешним факторам, более рискованным и, как следствие, менее прогнозируемым.

Современные реалии заставляют основных участников рынка искать новые, более совершенные подходы к управлению портфелем ценных бумаг. Увеличивается роль активных способов управления по сравнению с пассивным управлением. Если пассивное управление предполагает создание диверсифицированного портфеля ценных бумаг и поддержание его состава в неизменном состоянии в течение длительного времени, то активное управление подразумевает постоянное отслеживание краткосрочных и среднесрочных тенденций, периодическую адаптацию используемых торговых правил к текущим внешним условиям, совершение торговых операций при благоприятных внешних условиях.

Методы активного управления портфелем ценных бумаг используют определенные торговые правила, регламентирующие такие операции, как покупка финансового актива, продажа финансового актива, фиксация прибыли, фиксация ограниченного убытка по сделке и т.д. Совокупность торговых правил, регламентирующих полный цикл операций от покупки до продажи финансового актива, называется торговой системой (ТС). Для управления портфелем ценных бумаг может быть создана одна или несколько ТС. Набор торговых систем, применяемых инвестором, определяет инвестиционную стратегию управления финансовыми активами.

Основной задачей, стоящей перед инвестором, склонным к активному способу управления портфелем ценных бумаг, является задача выбора и адаптации из существующих или конструирования собственных ТС. Эта задача характеризуется следующими отличительными особенностями.

*Во-первых*, важнейшая проблема при выборе или конструировании ТС связана с многокритериальностью – отсутствием одного критерия, по которому можно выбрать лучшую торговую систему. ТС описываются широким набором критериев, отражающих такие ее свойства, как робастность системы (устойчивость); возможная доходность от использования системы; риск как вероятность потери части вложенных средств; максимальная продолжительность убыточных сделок; максимальные потери в одной сделке; общее количество сделок за период; кривая доходности системы и т.д. Основными способами преодоления многокритериальности являются, с одной стороны, конструирование разных принципов оптимальности и решение задачи поиска лучшей ТС на основе сформулированного принципа; с дру-

гой – использование субъективных предпочтений инвестора или лица, принимающего решения (ЛПР), о взаимной важности критериев и решение задачи с учетом его предпочтений.

*Во-вторых*, одна и та же ТС может идеально подходить для одного инвестора и оказаться совершенно непригодной для другого. При конструировании ТС необходимо учитывать те инвестиционные цели и ограничения, свойственные конкретному ЛПР, для которого разрабатывается ТС. Широкое разнообразие инвестиционных стратегий и преследуемых целей, а также разные возможности инвесторов (финансовые, ресурсные), практически сводят на нет тиражное распространение разработанных ТС без предварительной адаптации под конкретного инвестора.

*В-третьих*, при конструировании и оптимизации ТС необходимо учитывать, что ТС оптимизируются, тестируются и проверяются на исторических данных, и те результаты, которые достигнуты в процессе тестирования, могут не совпадать с результатами при реальном использовании ТС. Нередко встречаются ТС, показывающие удовлетворительные результаты на данных, на которых проходила настройка и оптимизация ее параметров, и крайне неудовлетворительные результаты при подаче на вход ТС текущих данных.

В связи с приведенными особенностями существует необходимость в разработке специальных моделей и методов для решения: 1) задачи оптимизации и выбора ТС в условиях многокритериальности, в наибольшей степени соответствующей инвестиционным целям и ограничениям ЛПР; 2) задачи поиска эффективной ТС, обеспечивающей желаемое для инвестора качество при изменении данных, подаваемых на вход.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что создание моделей и методов оптимизации ТС, позволяющих инвесторам с разными инвестиционными целями и ограничениями использовать их для разработки собственных активных стратегий управления портфелем ценных бумаг, является актуальной и востребованной темой.

**Целью диссертационной работы** является разработка инструментария, позволяющего инвесторам с разными инвестиционными стратегиями оценивать качество используемых ими ТС, осуществлять оптимизацию и поиск параметров ТС, при которых достигается наилучший результат от управления ценными бумагами. Предложенный в работе инструментарий включает в себя формальную модель ТС, методы формализации качества ТС, автоматические (с заданной целевой функцией) и диалоговые алгоритмы оптимизации ТС.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Исследование существующих методов управления и оптимизации портфеля ценных бумаг. Анализ существующих моделей и методов принятия решений в условиях многокритериальности.
2. Формальное описание обобщенной модели ТС. Обобщенная постановка задачи поиска эффективной ТС.
3. Формальное описание критериев, характеризующих качество ТС. Формулировка многокритериальных оптимизационных постановок задач выбора эффективной ТС.
4. Разработка автоматических и диалоговых алгоритмов оптимизации ТС.
5. Реализация программного модуля оптимизации и оценки качества ТС.
6. Оценка работоспособности программного модуля при оптимизации ТС для инвесторов с разными целями и ограничениями.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач исследования были использованы методы многокритериальной оптимизации, системного анализа и исследования операций, математической статистики, эконометрики, финансовой математики, методы экспертных оценок, теории реляционных баз данных, объектно-ориентированного проектирования и программирования.

### **На защиту выносятся:**

1. Формальное описание обобщенной модели ТС.
2. Многокритериальный подход при формализации постановки задачи выбора эффективной ТС для ЛПР, включающий построение критериев оценки качества ТС, постановку задачи оптимизации ТС.
3. Разработанные алгоритмы оптимизации ТС.
4. Разработанный программный модуль оптимизации и оценки качества ТС.
5. Результаты оптимизации торговых систем для инвесторов с разными целями и предпочтениями.

**Научная новизна.** Предложен многокритериальный подход при формализации постановки задачи оптимизации ТС. Множество предложенных критериев оценки качества ТС трансформировано в формальные постановки задач многокритериальной оптимизации. Разработаны алгоритмы оптимизации ТС с заданной (одной или несколькими) целевыми функциями. Разработан диалоговый алгоритм оптимизации ТС в условиях отсутствия аналитически выраженной целевой функции качества ТС.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что построены многокритериальные модели задачи поиска оптимальной ТС для инвесторов с разными инвестиционными стратегиями. Реализована программная среда, позволяющая инвесторам ставить и решать широкий набор оптимизационных задач и получать на выходе оптимальные, в смысле выбранной постановки задачи, параметры ТС.

**Внедрение результатов.** Разработанная программа оптимизации и оценки качества торговых систем реализована как отдельная подсистема в программном продукте международной компании Egat Technology – Focus. Программный продукт Focus представляет собой комплексное решение для автоматизации инвестиционной деятельности банков и инвестиционных компаний на рынке ценных бумаг. Система Focus используется во многих российских и западных компаниях и находится в промышленной эксплуатации в следующих организациях: Альфа Банк, Сбербанк, Промсвязьбанк, ИК «Капитал» и т.д.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной конференции «Современные сложные системы управления», Воронеж, 2003 г.;
- Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO), Москва, 2004 г.;
- Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO), Москва, 2005 г.;
- Семинарах на кафедре автоматизированных систем управления Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 124 наименований. Общий объем работы – 165 листов.

## Содержание работы

*Во введении* обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, рассмотрена научная новизна, практическая ценность и апробация полученных результатов.

*В первой главе* рассмотрены современные подходы к управлению портфелем ценных бумаг. Приведены классические постановки задач оптимизации инвестиционного портфеля. Описаны существующие подходы к конструированию активных стратегий управления портфелем ценных бумаг.

Во второй части первой главы рассмотрены известные формальные модели принятия решений, постановки многокритериальных задач принятия решений в условиях неопределенности, характеристики приоритета критериев, способа нормализации критериев. Проведен обзор основных принципов оптимальности и методов оптимизации в задачах принятия решения.

*Во второй главе*, на основе системного подхода к анализу инвестиционного процесса, задача управления портфелем ценных бумаг декомпозируется и разбивается на несколько подсистем: выработка инвестиционных целей инвестора, конструирование торговых систем, оптимизация торговых систем, оценка полученных результатов. Охарактеризуем основные цели и задачи основных подсистем.

### **Подсистема выявления предпочтений инвестора**

Подсистема выявления предпочтений ЛПП в общей схеме инвестиционного процесса позволяет выявить возможные ограничения инвестора на инвестиционный процесс, а также определить цели, преследуемые инвестором.

Ключевой задачей описываемой подсистемы является идентификация значимых для ЛПП критериев, характеризующих риски и качество управления портфелем ценных бумаг.

Для решения поставленных в данной подсистеме задач предлагается использовать двухэтапную схему. *На первом этапе* происходит анкетирование инвестора, по результатам которого определяются основные ограничения, накладываемые на процесс управления финансовыми активами, а также выявляются цели, которые должны быть достигнуты в результате реализации инвестиционной стратегии. Ответы, полученные в процессе анкетирования, позволяют позиционировать инвестора в вопросах возможностей относительно: стоимости портфеля, инвестиционной стратегии; предпочтений относительно типов ценных бумаг, включаемых в портфель, сегментов рынка, эмитентов ценных бумаг; требований к уровню доходности, к виду кривой доходности за период, к уровню риска, к степени ликвидности ценных бумаг.

Информация, полученная в результате анкетирования, используется для отбора финансовых активов и для построения ТС, удовлетворяющих предпочтениям инвестора.

*На втором этапе* идентификации предпочтений инвестора используется диалоговый алгоритм поиска ТС, оптимальной для ЛПП. В процессе поиска ЛПП активно взаимодействует с ЭВМ, определяя и уточняя свои цели и предпочтения. Формальное описание диалогового алгоритма приведено в разделе «Оптимизация торговых систем».

Предложенная двухуровневая схема выявления предпочтений позволяет инвестору участвовать в процессе управления ценными бумагами, непосредственно определяя цели управления, а также закладывать в модель управления специфичные предпочтения и ограничения. Возможность диалога с ЛПП практически на каждом этапе инвестиционного процесса позволяет нам рассматривать инвестиционный процесс как систему с обратной связью, в которой инвестор может постоянно осуществлять контроль над качеством портфеля инвестиций.

## Подсистема конструирования торговых систем

Задача конструирования ТС для управления портфелем ценных бумаг является одной из самых важных задач инвестиционного процесса. Как уже было отмечено выше, под ТС понимается алгоритмизированный набор правил, определяющих в каждый момент времени, какой финансовый актив и в каком объеме должен быть куплен (включен в портфель) или продан (исключен из портфеля).

Конструирование ТС представляет собой процесс, состоящий из нескольких взаимосвязанных этапов. Формальную схему конструирования ТС представим в виде обобщенного диалогового алгоритма.

*Алгоритм 1 – Обобщенный алгоритм конструирования ТС:*

1. Отобрать доступные финансовые активы. Выбрать горизонт инвестирования.
2. Разработать идею ТС. Формализовать правила совершения торговых операций.
3. Формализовать критерии, описывающие качество торговой системы.
4. Проверить качество ТС на исторических данных. Если качество ТС удовлетворительно, то перейти к шагу 8, иначе к шагу 5.
5. Проверка на возможность оптимизации ТС. Если оптимизация возможна, перейти к 6, иначе к 7.
6. Оптимизация ТС. Перейти к шагу 4.
7. Проверка на возможность пересмотра правил совершения торговых операций. Если пересмотр возможен, то перейти к 2, иначе к 10.
8. Проверка ТС на реальных данных.
9. Если качество ТС на реальных данных удовлетворительно, то перейти к 11. В противном случае – к 5.
10. Поиск прекратить, исключить ТС из рассматриваемых.
11. Поиск прекратить, включить ТС в портфель.

Постоянное участие ЛППР на всех стадиях алгоритма и возможность возврата и корректировки более ранних шагов способствуют созданию ТС, в наибольшей степени соответствующей целям инвестора. Охарактеризуем основные этапы создания ТС.

*Формальное описание модели ТС. Обобщенная постановка задачи поиска оптимальной ТС*

ТС может включать в себя следующие функциональные модули: модуль управления открытой позицией, модуль управления рисками, модуль управления капиталом. Назначение этих модулей сводится к исполнению правил открытия и закрытия позиции (совершению сделок покупки или продажи ценных бумаг), установке и контролю параметров риска, присущих ТС, расчету величины капитала под каждую сделку.

Прежде чем применять созданную идею ТС в инвестиционной деятельности, система должна быть представлена в виде формализованной модели, которую можно реализовать на одном из языков программирования и использовать для автоматического управления финансовыми активами. На рисунке 1 приведено формальное описание обобщенной модели ТС.

Обобщенная модель ТС включает в себя: входные параметры; правила и переменные, определяющие ТС (правила открытия и закрытия позиции, правила управления риском, правила управления капиталом); критерии оценки качества ТС.

***Входные параметры:***

$R(t) = \{r(1), r(2), \dots, r(N)\}$  – временной ряд цен на финансовый актив, где  $r(t)$  – цена на финансовый актив, зарегистрированная в  $t$ -ый момент времени ( $t = 1, 2, \dots, N$ );  $N$  – число рассматриваемых периодов.

$P(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\}$  – матрица входных параметров ТС. К входным параметрам относятся значения индикаторов технического анализа, макроэкономические показатели и т. д. Поскольку управление финансовыми активами процесс динамический, входные параметры представлены в виде временных рядов, а индекс  $t$  соответствует конкретному моменту времени,  $n$  – количество входных параметров, используемых в ТС.

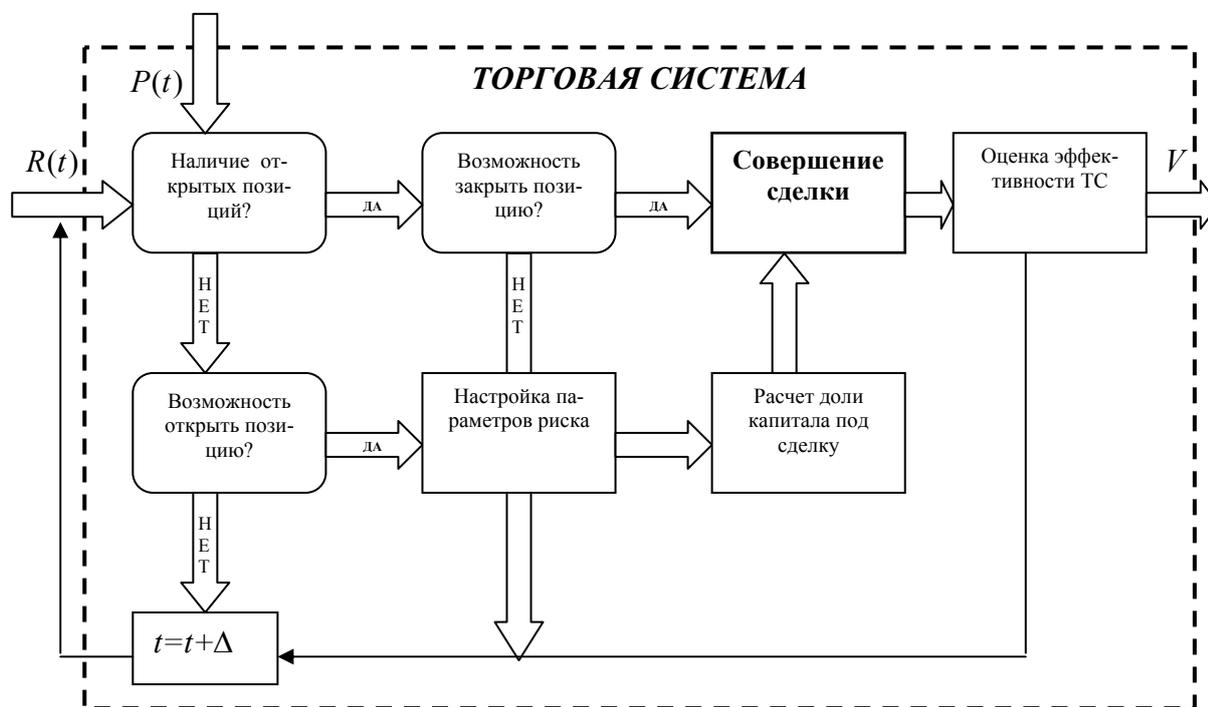


Рисунок 1. Обобщенная модель ТС

### **Переменные состояния ТС:**

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$  – вектор переменных состояния ТС. Переменные состояния ТС – это переменные, присутствующие в правилах открытия и закрытия позиции, в правилах управления рисками и капиталом.

### **Критерии качества ТС:**

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  – вектор критериев, описывающих качество ТС. Критерии качества ТС представляют собой набор показателей, характеризующих эффективность управления финансовыми активами.

Предложенная модель управления финансовыми активами позволяет нам сформулировать содержательную постановку оптимизации торговой системы – *подобрать на исторических данных  $R(t)$  и  $P(t)$ , где  $t = 1, \dots, N$ , такие значения переменных  $x_i$ , при которых критерии качества торговой системы  $v_j$  будут достигать лучших значений при реальном применении ТС.*

Идея, заложенная в метод решения поставленной задачи, заключается в том, что из исходного временного ряда цен на финансовый актив и матрицы входных параметров произвольным образом выделяется обучающая выборка:  $R_{об}(t) = \{r(1), r(2), \dots, r(k)\}$ ,  $P_{об}(t) = \{p_1(1, \dots, k), p_2(1, \dots, k), \dots, p_n(1, \dots, k)\}$  и экзаменационная выборка:  $R_{эк}(t) = \{r(k+1), r(k+2), \dots, r(N)\}$ ,  $P_{эк}(t) = \{p_1(k+1, \dots, N), p_2(k+1, \dots, N), \dots, p_n(k+1, \dots, N)\}$ , где  $K < N$ . На множестве  $R_{об}(t)$ ,  $P_{об}(t)$  ищется такой набор переменных состояния, обозначим его  $x^*$ , при котором целевой функционал качества  $V$  достигает экстремального значения. После того как вектор  $x^*$  получен, на вход ТС подаются значения экзаменационной выборки

$R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ . Решение считается найденным, если зафиксированные на этапе обучения переменные состояния  $x^*$ , при обработке торговой системой экзаменационных данных  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ , приводят к значениям целевой функции  $V$  удовлетворительным для ЛПР.

Для перехода к формальной постановке и решения задачи оптимизации ТС в работе приведен широкий набор критериев качества ТС, а также сформулированы различные постановки задач поиска лучшей альтернативы для инвестора, основанные на многокритериальном описании качества ТС.

Критерии качества ТС. Многокритериальные постановки задач поиска лучшей ТС

В таблице 1 приведены формальные критерии, описывающие доходности, риск и устойчивость ТС.

Таблица 1 – Формальное описание критериев качества ТС:

Название критерия	Формула расчета	
Наибольшее снижение капитала относительно первоначально инвестированных средств	$V_1 = \left\{ \min \left[ \frac{W_{t_1} - (L_{t_1} - R_{t_1})}{W_{t_0}}, \dots, \frac{W_{t_k} - (L_{t_k} - R_{t_k})}{W_{t_0}} \right] \right\},$ <p>где <math>W_{t_0}</math> – сумма первоначально инвестированных средств; <math>W_{t_k}</math> – величина капитала (торгового счета) в отчетный период <math>t_k</math>, <math>L_{t_k}</math> – сумма дополнительно привлеченных средств в отчетный период <math>t_k</math>, <math>R_{t_k}</math> – сумма изъятых средств в отчетный период <math>t_k</math>, <math>n</math> – количество отчетных периодов.</p>	(1)
Максимальный уровень потерь относительно наибольшего прироста капитала	$V_2 = \min_{t_k \in \{t_1, \dots, t_n\}} \left\{ \frac{W_{t_k} - (L_{t_k} - R_{t_k})}{W_{t_{k-1}}} \right\},$ $\max \left[ \frac{W_{t_1} - (L_{t_1} - R_{t_1})}{W_{t_0}}, \dots, \frac{W_{t_{k-1}} - (L_{t_{k-1}} - R_{t_{k-1}})}{W_{t_0}} \right]$	(2)
Критерий доходности ТС в % (Total % profit)	$V_3 = \prod_{i=1}^{Total Trades} [1 + \%profit(i)] - 1,$ <p>где <i>Total Trades</i> – общее количество сделок, сгенерированных торговой системой в период тестирования; <i>%profit(i)</i> – величина дохода в сделке <i>i</i>, выраженная в процентах.</p>	(3)
Доходность ТС, выраженная в % годовых (Total % profit in year)	$V_4 = \prod_{i=1}^{Total Trades} [1 + \%profit(i)]^{\frac{365}{Total days}} - 1,$ <p>где <i>Total days</i> – число дней, в течение которых проходило тестирование ТС.</p>	(4)
Отношение доходности ТС к доходности стратегии «Buy and Hold»	$V_5 = \left( \prod_{i=1}^{Total Trades} [1 + \%profit(i)]^{\frac{365}{Total days}} - 1 \right) / \left( \left[ \frac{Price_{t_n}}{Price_{t_0}} \right]^{\frac{365}{Total days}} \right),$ <p>где <math>Price_{t_n}</math> – цена на финансовый актив в конце тестирования; <math>Price_{t_0}</math> – цена на финансовый актив в начале тестирования.</p>	(5)
Средний доход в одной сделке выраженный в % (avg % profit)	$V_6 = \exp \left[ \frac{1}{Total trades} \sum_{i=1}^{Total trades} \ln(1 + \%profit(i)) \right] - 1,$	(6)

Наибольшее снижение торгового счета за одну сделку	$V_7 = \max_{i \in Total\ trades} [\max \% drawdown(i)],$ <p>где <math>\max \% drawdown(i)</math> – максимальное снижение торгового счета за сделку <math>i</math>.</p>	(7)
Среднее значение максимальных снижений торгового счета за одну сделку	$V_8 = \exp \left[ \frac{1}{Total\ Trades} \sum_{i=1}^{Total\ trades} \ln(1 + \max \% drawdown(i)) \right] - 1,$	(8)
Процент выигрышных сделок (Win trades %)	$V_9 = \frac{Total\ Win\ Trades}{Total\ Trades} * 100,$ <p>где <math>Total\ Win\ Trades</math> – общее число выигрышных сделок.</p>	(9)
Средняя прибыль выигрышных сделок (avg % win)	$V_{10} = \exp \left[ \frac{1}{Total\ Win\ trades} \sum_{i=1}^{Total\ Win\ trades} \ln(1 + \% profit(i)) \right] - 1,$	(10)
Процент проигрышных сделок (loss trades %)	$V_{11} = \left( 1 - \frac{Total\ Win\ Trades}{Total\ Trades} \right) * 100,$	(11)
Средний убыток проигрышных сделок (avg net loss)	$V_{12} = \exp \left[ \frac{1}{Total\ Loss\ trades} \sum_{i=1}^{Total\ Loss\ trades} \ln(1 + \% profit(i)) \right] - 1,$ <p>где <math>Total\ Loss\ Trades</math> – общее число проигрышных сделок.</p>	(12)
Отношение средней прибыли выигрышных сделок к среднему убытку проигрышных сделок	$V_{13} = \frac{\exp \left[ \frac{1}{Total\ Win\ trades} \sum_{i=1}^{Total\ Win\ trades} \ln(1 + \% profit(i)) \right] - 1}{\exp \left[ \frac{1}{Total\ Loss\ trades} \sum_{i=1}^{Total\ Loss\ trades} \ln(1 + \% profit(i)) \right] - 1},$	(13)
Средняя эффективность открытия позиции	$V_{14} = \frac{1}{Open\ Trades} \sum_{i=1}^{Open\ Trades} (Enter\ efficiency_{Long(Short)}(i)),$ <p>где <math>Open\ Trades</math> – общее количество сгенерированных системой сделок открывающих позицию; <math>Enter\ efficiency</math> – эффективность открытия позиции для сделки <math>i</math>.</p>	(14)
Средняя эффективность закрытия позиции	$V_{15} = \frac{1}{Close\ Trades} \sum_{i=1}^{Close\ Trades} Exit\ efficiency_{Long(Short)}(i),$ <p>где <math>Close\ Trades</math> – общее количество сгенерированных системой сделок, закрывающих позицию; <math>Exit\ efficiency</math> – эффективность закрытия позиции для сделки <math>i</math></p>	(15)
Среднеквадратическое отклонение дохода в %	$V_{16} = (1 + V_6) * \sqrt{\frac{1}{Total\ Trades - 1} \sum_{i=1}^{Total\ Trades} (\ln(1 + \% profit(i)) - \ln(1 + V_6))^2},$	(16)
Среднеквадратическое отклонение наибольших снижений торгового счета в %	$V_{17} = (1 + V_8) * \sqrt{\frac{1}{Total\ Trades - 1} \sum_{i=1}^{Total\ Trades} (\ln(1 + \% drawdown(i)) - \ln(1 + V_8))^2},$	(17)

Максимальное количество идущих подряд проигрышных сделок	$V_{18} = \max \text{consecutive losses}$ , где $\max \text{consecutive losses}$ – наибольшее количество проигрышных сделок, следовавших одна за другой.	(18)
Чистая прибыль торговой системы	$V_{19} = \text{Win Amount} - \text{Loss Amount} - \text{Total Comission}$ , где $\text{Win Amount}$ – общая прибыль всех выигрышных сделок; $\text{Loss Amount}$ – общий убыток всех проигрышных сделок; $\text{Total Comission}$ – общая сумма уплаченной комиссии.	(19)
Коэффициент «присутствия» ТС на рынке	$V_{20} = \frac{\% \text{int trade}}{\% \text{out trade}}$ , где $\% \text{int trade}$ – доля времени, в течение которого система имела открытые позиции; $\% \text{out trade}$ – доля времени, в течение которого системы была вне рынка.	(20)

Предложенный набор критериев остается открытым и может быть расширен дополнительными критериями, описывающими те или иные аспекты торговой системы.

Для решения проблемы неопределенности, связанной с многокритериальным описанием качества ТС, в работе предложены два подхода. Первый подход основан на формализации понятия «лучшая» ТС в виде множества однокритериальных и многокритериальных оптимизационных задач, соответствующих разным типам инвестиционных стратегий. Второй подход основан на создании диалогового алгоритма поиска оптимальной для инвестора ТС.

На основании введенных критериев в работе сформулированы и формализованы требования инвестора к качеству ТС в виде ограничений и целевых функций.

#### Функции ограничений инвестора

В зависимости от инвестиционной стратегии инвестора, его отношения к риску, на инвестиционный процесс могут быть наложены разные ограничения, формализованные при помощи известных принципов оптимальности. Представим несколько примеров ограничений.

1. Ограничения инвестора на значение критериев риска: критерий наибольшего снижения капитала относительно первоначально инвестированных средств и критерий наибольшего снижения торгового счета за одну сделку:

$$G_1 = \left\{ \arg_{x=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}} (\lambda_1 \cdot V_1 + \lambda_7 \cdot V_7) \leq Z_{gr} \right\}, \quad (21)$$

где  $x$  – вектор переменных состояния ТС;  $\lambda$  – весовой коэффициент критерия, входящего в функцию ограничения;  $Z_{gr}$  – граничное значение свертки критериев  $V_1, V_7$  по принципу абсолютной уступки.

2. Ограничения инвестора на соотношение критериев риска – процент проигрышных сделок, максимальное количество идущих подряд проигрышных сделок и критерия доходности системы – чистая прибыль торговой системы:

$$G_2 = \left\{ \arg_{x=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}} \left( \frac{V_{11}^{\lambda_{11}} \cdot V_{18}^{\lambda_{18}}}{1 + V_{19}^{\lambda_{19}}} \right) \leq Z_{gr} \right\}, \quad (22)$$

где  $Z_{gr}$  – граничное значение свертки критериев  $V_{11}, V_{18}, V_{19}$  по принципу относительной уступки. Определяется исходя из отношения ЛПР к риску.

3. Ограничения инвестора на соотношение устойчивости величины риска – критерий  $V_8$  и критерия доходности  $TC - V_5$ , а также на соотношения процента выигрышных и проигрышных сделок:

$$G_3 = \left\{ \mathbf{arg}_{x=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}} \left( \frac{\lambda_8 \cdot V_8}{\lambda_5 \cdot V_5} + \frac{\lambda_9 \cdot V_9}{\lambda_{11} \cdot V_{11}} \right) \leq Z_{gr} \right\}. \quad (23)$$

4. Ограничение инвестора на величину характеризующую отношение среднего дохода в одной сделке к среднеквадратическому отклонению дохода:

$$G_4 = \left\{ \mathbf{arg}_{x=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}} \left( \frac{\lambda_6 \cdot V_6}{1 + \lambda_{16} \cdot V_{16}} \right) \geq Z_{gr} \right\}. \quad (24)$$

5. Ограничение на отдаленность значений критериев риска: наибольшего снижения торгового счета за одну сделку, процента проигрышных сделок, среднего убытка проигрышных сделок, максимального количества идущих подряд проигрышных сделок от идеальных для ЛПР значений:

$$G_5 = \left\{ \mathbf{arg}_{x=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}} \left( \sum_k \lambda_k \left( \max(0, V_k - V_k^I) \right) \right) \leq Z_{gr} \right\}, \quad (25)$$

где  $k = 7, 11, 12, 18$ ;  $V_k^I$  – приемлемое для инвестора значение критерия  $V_k$ .

6. Ограничение на отдаленность значений критериев доходности: доходности  $TC$ , среднего дохода в одной сделке, средней прибыли выигрышных сделок от идеальных для ЛПР значений:

$$G_6 = \left\{ \mathbf{arg}_{x=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}} \left( \sum_k \lambda_k \left( \max(0, V_k^I - V_k) \right) \right) \leq Z_{gr} \right\}, \quad (26)$$

где  $k = 3, 6, 10$ ;  $V_k^I$  – приемлемое для инвестора значение критерия  $V_k$ .

### Многокритериальные постановки задач оптимизации $TC$

Комбинируя и объединяя на основе разных принципов оптимальности критерии и ограничения, можно получить достаточно широкий набор постановок задач оптимизации, которые могут соответствовать разным требованиям инвестора, его представлениям о том, какие решения лучшие. Приведем в качестве иллюстрации несколько постановок задач оптимизации.

1. Задача минимизации критерия наибольшего снижения капитала относительно первоначально инвестированных средств с учетом ограничений на соотношение критериев риска и критерия доходности системы:

$$X_1^* = \mathbf{arg\,min}_{x \in G_2} V_1; \quad (27)$$

2. Задача минимизации критериев наибольшего снижения капитала относительно первоначально инвестированных средств и максимального уровня потерь относительно наибольшего прироста капитала с учетом ограничений на соотношение критериев риска и критерия доходности системы:

$$X_2^* = \mathbf{arg\,min}_{x \in G_2} (\alpha_1 \cdot V_1 + \alpha_2 \cdot V_2). \quad (28)$$

3. Задача максимизации критерия доходности  $TC$ , выраженной в % годовых, с учетом ограничения на основные показатели риска:

$$X_3^* = \mathbf{arg\,max}_{x \in G_1} V_4. \quad (29)$$

4. Задача максимизации критерия отношения доходности  $TC$  к доходности стратегии «Buy and Hold» с учетом ограничений инвестора на величину, характеризующую отношения среднего дохода в одной сделке и среднеквадратического отклонения дохода сделок:

$$X_4^* = \mathbf{arg\,max}_{x \in G_4} V_5. \quad (30)$$

5. Задача максимизации отношения средней прибыли выигрышных сделок и среднего убытка проигрышных сделок с учетом ограничений инвестора на отдаленность значений критериев риска от приемлемых для него значений:

$$X_5^* = \mathbf{arg\,max}_{x \in G_5} \left( \frac{\alpha_{10} \cdot V_{10}}{\alpha_{12} \cdot V_{12}} \right). \quad (31)$$

6. Задача максимизации средней эффективности открытия и средней эффективности закрытия позиции с учетом ограничений инвестора на соотношение устойчивости величины риска и критерия доходности, а также на соотношение процента выигрышных и проигрышных сделок:

$$X_6^* = \mathbf{arg\,max}_{x \in G_3} (\alpha_{14} \cdot V_{14} + \alpha_{15} \cdot V_{15}). \quad (32)$$

7. Задача максимизации отношения чистой прибыли ТС к среднему значению максимальных снижений торгового счета за одну сделку с учетом ограничений инвестора на основные показатели риска:

$$X_7^* = \mathbf{arg\,max}_{x \in G_1} \left( \frac{\alpha_{19} \cdot V_{19}}{\alpha_8 \cdot V_8} \right). \quad (33)$$

8. Задача минимизации времени «присутствия» ТС на рынке с учетом требований инвестора к критериям риска и доходности:

$$X_8^* = \mathbf{arg\,min}_{x \in (G_5 \cup G_6)} (V_{20}). \quad (34)$$

9. Задача минимизации отклонения реальной кривой доходности ТС от эталонной кривой доходности с учетом ограничения инвестора на величину, характеризующую отношения среднего дохода в одной сделке и среднеквадратического отклонения дохода сделок.

$$X_9^* = \mathbf{arg\,min}_{x \in G_4} (W_{t_k} - W_{t_k}^I)^2, \quad (35)$$

где  $W_{t_k}$  – реальное значение кривой доходности в отчетный период  $t_k$ ,  $W_{t_k}^I$  – идеальное значение кривой доходности в отчетный период  $W_{t_k}^I$ .

Весовые коэффициенты  $\alpha$  задаются экспертным путем и позволяют определять значимость частных критериев в обобщенных постановках задач поиска лучшей альтернативы.

Предложенный набор постановок задач остается открытым и может быть расширен дополнительным сочетанием критериев качества ТС и ограничений инвестора на инвестиционный процесс.

Фактически выбор той или иной постановки задачи не является математической проблемой, а должен вести к решению, удовлетворяющему требованиям ЛППР, и отражать его представления о качестве решения. Чем больше вариантов постановок задач оптимизации и их решений рассматривается инвестором, тем больше шансов найти решение, полностью его удовлетворяющее.

Таким образом, важной рекомендацией по использованию предложенных постановок задач может быть их комбинирование и разумное сочетание их применения в диалоге с ЛППР.

### **Подсистема оптимизации торговых систем**

В данном разделе предложены автоматические (с заданной целевой функцией) и диалоговые алгоритмы ТС.

Алгоритм 2 – Поиск оптимальной ТС с заданной целевой функцией:

1. Выделить из исходных данных  $R(t)$ ,  $P(t)$  обучающее и экзаменационное подмножество –  $R_{об}(t)$ ,  $P_{об}(t)$  и  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ .
2. Задать интервал допустимых значений и шаг изменения переменных состояния  $x$ .
3. Выбрать функцию качества ТС  $V = V(v_1, v_2, \dots, v_m)$  и функцию ограничений  $G = G(v_1, v_2, \dots, v_m)$ .
4. Выбрать из доступных метод поисковой оптимизации (метод перебора, метод покоординатного спуска, метод деформируемых конфигураций с произвольным симплексом).
5. Задать начальную точку вектора переменных состояния системы –  $x^L = \{x_1^L, x_2^L, \dots, x_j^L\}$ ,  $L = 0$ .
6. Последовательно подать на вход торговой системе и обработать элементы обучающего подмножества  $R_{об}(t)$ ,  $P_{об}(t)$ .
7. Вычислить значения критериев качества торговой системы –  $\{v_1^L, v_2^L, \dots, v_m^L\}$ .
8. Проверить ограничения ЛПР на инвестиционный процесс:  $G^L = G(v_1^L, v_2^L, \dots, v_m^L)$ . В случае если ограничения нарушены, то присвоить  $G^L = 0$ .
9. Вычислить значение целевой функции качества ТС:  $V = V(v_1, v_2, \dots, v_m)$ .
10. Если  $L > 0$ , то сравнить значение целевой функции со значением на предыдущем шаге: если  $V^L < V^{L-1}$  ИЛИ  $G^L = 0$ , то признать шаг неудачным, перейти к п. 12; если  $V^L > V^{L-1}$  И  $G^L < 0$ , то признать шаг удачным<sup>1</sup>.
11. Запомнить вектор  $x^L$  и значение целевой функции  $V^L$ .
12. Проверить правило останова. Если правило останова выполнено, то поиск прекратить, запомнить вектор переменных состояния с номером  $L$ , обозначим его как:  $x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_j^*\}$  и перейти к п. 14.
13. Изменить в соответствии с выбранным методом оптимизации вектор  $x^L = \{x_1^L, x_2^L, \dots, x_j^L\}$ ,  $L = L + 1$ . Перейти к п. 6.
14. Подать на вход ТС и обработать элементы экзаменационной выборки  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ .
15. Вычислить значения критериев качества торговой системы –  $\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\}$ .
16. Проверить ограничения ЛПР на инвестиционный процесс:  $G^* = G(v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*)$ . В случае если ограничения нарушены, перейти к п. 20.
17. Вычислить значение целевой функции качества ТС:  $V^* = V(v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*)$ .
18. Предоставить ЛПР для оценки качества значение целевой функции  $V^* = V(v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*)$ . Если качество удовлетворительное, то перейти к п. 20.
19. Поиск прекратить, признать результаты тестирования ТС неудовлетворительными. Вернуться на стадию конструирования ТС.
20. Поиск прекратить, включить ТС в портфель управления финансовыми активами.

Дадим пояснения к алгоритму. В пунктах 1 и 2 программа случайным образом генерирует из исходных данных обучающее и экзаменационное подмножество, а также по умолчанию устанавливает шаг изменения переменных состояния ТС. При необходимости ЛПР может задать количество экзаменационных периодов, на которых требуется проверка качества ТС; задать структуру обучающего и экзаменационных подмножеств; изменить шаг, максимальное и минимальное значение переменных состояния ТС  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ .

---

<sup>1</sup> Если целевая функция минимизируется, то знак неравенства при сравнении  $V^L$  и  $V^{L-1}$  необходимо изменить на противоположный.

В пункте 3 программа предлагает на выбор ЛПР одну из целевых функций качества ТС и возможные функции ограничения на инвестиционный процесс. ЛПР может выбрать целевую функцию и ограничения из предложенных программой либо сконструировать собственную оптимизационную постановку задачи на основе широкого набора введенных локальных критериев.

В пункте 4 программа по умолчанию предлагает один из методов поисковой оптимизации ТС с возможностью его изменения пользователем. Для выбора метода по умолчанию оценивается количество предполагаемых операций при полном переборе всех комбинаций переменных состояния  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$  и в зависимости от этого предлагается либо метод перебора, либо один из методов прямого поиска.

В пунктах 5-13 происходит оптимизация ТС на множестве обучающих данных. В процессе оптимизации отыскивается вектор переменных состояния торговой системы  $x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_j^*\}$ , при котором, во-первых, соблюдены все ограничения ЛПР на инвестиционный процесс  $G = G(v_1, v_2, \dots, v_m)$ , во-вторых, достигается максимум целевой функции  $V = V(v_1, v_2, \dots, v_m)$  качества ТС. Для прекращения поиска программа позволяет выбрать одно из следующих правил останова: процесс поиска прекратить при выполнении определенного числа шагов; процесс поиска прекратить при достижении целевой функции заданного значения; решение о прекращении поиска принимает ЛПР.

В пунктах 14-20 осуществляется проверка качества ТС с зафиксированным вектором переменных состояния  $x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_j^*\}$  на экзаменационной выборке. Если качество ТС удовлетворительное для ЛПР, то она включается в портфель управления финансовыми инструментами, в противном случае требуется переработка правил, заложенных в ТС.

Таким образом, моделируется работа ТС в реальных условиях, когда торговые решения принимаются на данных, еще не известных в момент проектирования и тестирования ТС. Такой подход позволяет минимизировать вероятность «подгонки» ТС под конкретный исторический ряд цен и набор входных параметров.

*Алгоритм 3 – Поиск оптимальной ТС с несколькими целевыми функциями качества:*

1. Выделить из исходных данных  $R(t)$ ,  $P(t)$  обучающее и экзаменационное подмножество:  $R_{об}(t)$ ,  $P_{об}(t)$  и  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ .
2. Задать интервал допустимых значений и шаг изменения переменных состояния  $x$ .
3. Выбрать из доступных метод поисковой оптимизации (метод перебора, метод покоординатного спуска, метод деформируемых конфигураций с произвольным симплексом).
4. Задать начальную точку вектора переменных состояния системы –  $x^L = \{x_1^L, x_2^L, \dots, x_j^L\}$ ,  $L = 0$ .
5. Задать ряд приоритета оптимизационных задач, отражающий предпочтения ЛПР. Например, задан ряд, состоящий из следующих постановок задач –  $\{X_1^*, X_3^*, X_2^*\}$ .
6. Задать коэффициенты уступок для каждой целевой функции:  $\nabla_1, \nabla_2, \nabla_3$ .
7. Изменяя в соответствии с выбранным методом оптимизации вектор переменных ТС  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ , решить на множестве обучающих данных следующую последовательность оптимизационных задач:

$$X_1^* = \arg \min_{x \in G_2} (V_1 - \nabla_1);$$

$$X_3^* = \arg \max_{x \in (X_1^* \cup G_1)} (V_4 - \nabla_2);$$

$$X_2^* = \arg \max_{x \in (X_2^* \cup G_2)} (\alpha_{14} \cdot V_{14} + \alpha_{15} \cdot V_{15}) - \nabla_3$$

8. Запомнить вектор  $x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_j^*\}$ , при котором указанная последовательность задач была успешно решена.
9. Подать на вход ТС и обработать элементы экзаменационной выборки  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ .
10. Проверить ограничения ЛПР на инвестиционный процесс:  $G^* = G(v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*)$ . В случае, если ограничения нарушены, перейти к п. 13.
11. Вычислить значения критериев качества торговой системы –  $\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\}$ .
12. Предоставить ЛПР для оценки значения целевых функций  $X_1^*, X_3^*, X_2^*$  и значения критериев качества ТС  $\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\}$ .
13. Если качество удовлетворительное, то перейти к п. 14.
14. Поиск прекратить, признать результаты тестирования ТС неудовлетворительными. Вернуться на стадии конструирования ТС.
15. Поиск прекратить, включить ТС в портфель управления финансовыми активами.

В отличие от предыдущего алгоритма, этот алгоритм применяется в случае, если ЛПР затруднился выбрать единственную оптимизационную постановку задачи. Данный алгоритм позволяет ЛПР изменять величины уступок –  $\nabla$ . И, тем самым, влиять на решения и «интересы» последующих целевых функций.

#### Диалоговый алгоритм оптимизации ТС

Предложенный в работе диалоговый алгоритм поиска лучшей ТС основывается на классе методов поисковой оптимизации – методах деформируемых конфигураций.

Для поиска оптимального значения функции качества на каждой итерации используется некоторая конфигурация. Конфигурацией в общем случае является множество точек (вершин), выбранных специальным образом в пространстве возможных альтернатив. Пусть на каждом  $N$  – ом шаге в качестве базовой конфигурации используется комплекс  $S_N$  с вершинами  $x^{N,i}$ , ( $i = 1, \dots, R$ ,  $R$  – количество вершин комплекса ( $R \geq j + 1$ ),  $j$  – количество переменных состояния ТС), в которых вычислены значения локальных критериев (или их свертки)  $(V_1(x^{N,j}), \dots, V_m(x^{N,j}))$ . В каждой вершине ЛПР делит критерии на три группы:  $m$  критериев, значения которых нужно улучшать (им присваиваются номера вершин от 1 до  $m$ );  $l$  критериев, значения которых нельзя ухудшать, и  $n + 1 - m - l$  критериев, значения которых можно ухудшить (номера вершин от  $n + 1 - m - l$  до  $k$ ).

Используя заданный принцип оптимальности, каждая вершина заменяется (отображается) на новую, и конструируется новый комплекс  $S_{N+1}$ . В новых вершинах комплекса  $S_{N+1}$  вычисляются значения локальных критериев, и ЛПР снова делит критерии каждой вершины на три группы. Отображение вершин продолжается до тех пор, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее ЛПР, или не сработает правило останова. Ниже приведено формальное описание диалогового алгоритма с заложенным принципом оптимальности относительной уступки.

*Алгоритм 4 – Поиск оптимальной торговой системы в условиях отсутствия целевой функции в явном виде:*

1. Выделить из исходных данных  $R(t)$ ,  $P(t)$  обучающее и экзаменационное подмножество –  $R_{об}(t)$ ,  $P_{об}(t)$  и  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ .
2. Задать количество переменных состояния; интервал допустимых значений; шаг изменения переменных состояния  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ ; количество вершин на каждой итерации  $R$ , где  $R \geq j + 1$ .
3. Задать начальную точку вектора переменных состояния системы –  $x^N = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ ,  $N = 1$ .

4. На множестве обучающих данных сгенерировать комплекс  $S_N$  с центром  $x^N$  и вершинами  $x^{N,i}$  где  $i = 1, \dots, R$ .
5. В вершинах  $x^{N,i}$ , где  $i = 1, \dots, R$  вычислить значения локальных критериев  $(V_1(x^{N,i}), \dots, V_m(x^{N,i}))$ .
6. ЛПР разбить все вершины на две группы:  $T_1$  – вершины, требующие улучшения;  $T_2$  – вершины, подходящие для применения.
7. Запомнить координаты всех вершин  $x^{N,i}$ , входящих в группу  $T_2$ :  $x_i = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ ,  $i = 1, \dots, R_{T_2}$ , где  $R_{T_2}$  – количество вершин входящих в группу  $T_2$ .
8. Проверить правила останова. Если правила останова выполнены и найдены вершины, удовлетворяющие ЛПР, то перейти к п. 14. Если правило останова выполнено и не найдено ни одной вершины удовлетворяющей ЛПР, то перейти к п. 13.
9. В каждой вершине  $x^{N,i}$  из группы  $T_1$  ЛПР делит критерии  $(V_1(x^{N,i}), \dots, V_m(x^{N,i}))$  на три группы:  $m$  критериев, значения которых нужно улучшать;  $l$  критериев, значения которых нельзя ухудшать;  $k+l-m-l$  критериев, значения которых можно ухудшить.
10.  $N = N + 1$
11. Построить новый комплекс  $S_N$ , отобразив каждую вершину из группы  $T_1$  по следующему правилу<sup>2</sup>:

$$\begin{cases} x^{N+1,i} = \arg \max_{x \in Z} \prod_{p=1}^m \lambda_p \cdot V_p \\ Z = \{V_p(x^{N+1,i}) \geq V_p(x^{N,j})\}, p = m+1, \dots, m+l \end{cases}$$

12. Перейти к п. 5.
13. Поиск прекратить, сообщить ЛПР, что не найдено ни одного решения, удовлетворяющего его интересам.
14. Для каждой вершины  $x^{N,i}$ , входящей в группу  $T_2$ , подать на вход и обработать элементы экзаменационной выборки  $R_{эк}(t)$ ,  $P_{эк}(t)$ .
15. Предоставить ЛПР результаты работы торговой системы для каждой вершины  $x^{N,i}$ , входящей в группу  $T_2$ .
16. Включить в портфель варианты торговой системы, удовлетворяющие ЛПР.

Опишем подробнее идею и особенности приведенного алгоритма. На каждом шаге ЛПР предлагается для сравнения несколько вариантов реализаций одной торговой системы. Оценивая каждый вариант, ЛПР определяет его качество, и в случае, если оно неудовлетворительно, выделяет критерии, которые должны быть улучшены, и критерии, которые не должны ухудшиться. Другими словами, ЛПР для каждого варианта реализации задает направление, в котором нужно улучшать торговую систему. Далее, в соответствии с заложенным в структуру алгоритма принципом оптимальности и полученной от ЛПР информацией, осуществляется переход от первоначального варианта реализации торговой системы к следующему. Полученный результат вновь подается ЛПР для оценки его качества.

Важной особенностью алгоритма по сравнению с предыдущими является то, что ЛПР имеет возможность оценивать сразу несколько альтернатив и вести поиск лучшей альтернативы в нескольких направлениях.

Отметим также, что важным фактором, влияющим на качество полученных результатов, является выбранный принцип оптимальности, позволяющий сравнивать альтернативы в пространстве критериев. Важной рекомендацией по использованию данного алгоритма является согласование принципа оптимальности с ЛПР, а также использование нескольких прин-

<sup>2</sup> В предложенной постановке предполагается, что значения всех критериев нужно максимизировать. Если какие то критерии нужно минимизировать (например, риск), то достаточно изменить знак локального критерия

ципов оптимальности и сравнение результатов, получаемых при использовании разных принципов.

**В третьей главе** описывается программная реализация подсистемы оптимизации и оценки качества ТС. Рассматривается архитектура системы, основная функциональность, описывается пользовательский интерфейс.

Программное обеспечение системы Egar Focus реализовано в трехуровневой архитектуре «клиент; сервер – приложений; сервер базы данных».

Серверная часть системы состоит из сервера базы данных, управляемой СУБД «Microsoft SQL Server 2000», и сервера приложений, состоящего, в свою очередь, из ряда функционально не зависимых сервисов, обеспечивающих контроль и управление биржевыми заявками, контроль и управление сделками, контроль и управление структурой лимитов, формирование аналитической отчетности.

Клиентская часть системы реализована как приложение для операционной системы «Microsoft Windows» на языке программирования «Visual Basic» с использованием средства разработки приложений «Microsoft Visual Basic» и предназначена для формирования запросов к серверу, обработки данных и их представления в виде таблиц, графиков, диаграмм и гистограмм. Система оптимизации и оценки качества ТС интегрирована в клиентское приложение как отдельная подсистема.

При построении информационной системы Egar Focus применялся объектно-ориентированный подход, язык моделирования «UML». Разработанная подсистема является открытой и может быть расширена за счет добавления новых критериев, постановок задач и алгоритмов оптимизации ТС.

**В четвертой главе** приводятся примеры оптимизации торговых систем для инвесторов с разными целями и ограничениями. Примеры оптимизации приведены для двух разных инвесторов, использующих в своей торговле ценными бумагами разные торговые правила.

Ниже приведены требования и инвестиционные цели инвесторов, полученные в результате работы подсистемы «выявления предпочтений инвестора», характеристики используемых ими ТС, а также результаты поиска оптимальных торговых систем.

### **Общая характеристика Инвестора 1**

**Общая характеристика инвестиционной стратегии.** Тип инвестиционной стратегии – среднесрочный, но допустимы краткосрочные операции с целью получения спекулятивной прибыли; изменение стоимости портфеля в течение инвестиционного периода возможно только за счет получения прибыли или убытков; величина потери в одной сделке не может превышать 10% от суммы сделки; общая величина снижения инвестиционного счета не должна быть больше 30%; допустимы отчетные периоды с отрицательной доходностью, но общая доходность за весь период должна быть не менее 30%; первоначальная стоимость портфеля не должна превышать 10 000\$.

**Характеристики используемой ТС.** ТС, используемая данным инвестором, широко известна и называется - Trading system Stochastic – 20/80. Она предназначена для работы на достаточно волатильных рынках, которым присущи периодические колебания цен и краткосрочная смена трендов. ТС Stochastic – 20/80 основана на одном из индикаторов технического анализа – стохастическом осцилляторе. Стохастический осциллятор сопоставляет текущую цену закрытия с диапазоном цен за выбранный период времени и, в зависимости от отношения текущей цены к минимальным и максимальным ценам за выбранный период, генерирует сигнал на покупку или продажу актива.

Оптимизация и проверка качества ТС проводилась на одном из биржевых инструментов – акции компании ОАО «АЭРОФЛОТ» (сокращенно - «АЭРОФЛОТ»). Данный актив по

своим стоимостным и прочим параметрам входит в число доступных для инвесторов ценных бумаг.

*Общие параметры ТС:* период тестирования с 28.05.2004 по 30.05.2006; периодичность – 1 день; тип используемых цен – цены закрытия; начальный депозит – 10000\$; величина комиссии на сделку – 0.019%.

*Входные параметры ТС:* динамика цен биржевого актива «АЭРОФЛОТ», значения индикатора Stochastic.

*Правила открытия позиции:* открытие длинной позиции – в случае, когда значение индикатора Stochastic сначала опустится ниже определенного уровня OPT1, а затем поднимется выше уровня OPT1. Открытие короткой позиции – в случае, когда значение индикатора Stochastic сначала поднимется выше определенного уровня OPT2, а затем опустится ниже уровня (OPT2).

*Правила закрытия позиции:* закрытие длинной позиции – в случае, когда значение индикатора Stochastic опустится ниже определенного уровня OPT1. Закрытие короткой позиции - в случае, когда значение индикатора Stochastic поднимется выше определенного уровня (OPT2).

*Правила управления рисками:* уровень принудительного закрытия позиции с фиксацией убытка (Stop Loss) – 5% от цены приобретения актива. Уровень закрытия позиции с фиксацией прибыли (Take Profit) – 15% от цены приобретения актива.

*Правила управления капиталом:* отсутствуют.

*Переменные состояния ТС (оптимизационные переменные):* OPT1 – значение индикатора stochastic, при котором генерируется сигнал на открытие длинной позиции. OPT2 – значение индикатора stochastic, при котором генерируется сигнал на открытие короткой позиции.

#### Постановка оптимизационной задачи

*Целевая функция и функция ограничений инвестора.* В результате диалога с ЛПР была сформулирована задача максимизации критерия доходности ТС, выраженной в % годовых, с учетом ограничения на основные показатели риска. Формальная поставка данной задачи приведена в (29). Инвестор установил равнозначную важность локальных критериев входящих в функцию ограничений, т.е.  $\lambda_1 = \lambda_7 = 0.5$ . Граничное значение свертки критериев риска –  $V_1, V_7$  равно 40%, т.е.  $Z_{gr} = 40\%$  (задано инвестором).

*Оптимизируемые параметры:* OPT1 и OPT2. Переменные OPT1 и OPT2 должны удовлетворять следующим условиям:  $0 < OPT1 \leq 50$ ;  $50 < OPT2 \leq 95$ . Шаг изменения параметров OPT1 и OPT2 равен 5. Данные ограничения на переменные связаны с экономической интерпретацией осциллятора Stochastic.

*Метод оптимизации.* Для решения задачи оптимизации торговой системы Stochastic – 20/80 с двумя оптимизируемыми параметрами OPT1 и OPT2 был выбран метод полного перебора. Данный выбор обусловлен тем, что число возможных состояний системы – не более 100 вариантов и полный перебор всех комбинаций оптимизируемых параметров может быть выполнен с минимальными временными затратами.

*Используемый алгоритм поиска лучшей ТС.* Алгоритм 2 – Поиск оптимальной торговой системы с заданной целевой функцией.

*Правило останова.* Поиск будет прекращен после перебора всех сочетаний оптимизируемых параметров OPT1 и OPT2.

*Объем обучающей и экзаменационной выборки.* В рассматриваемой задаче выделена одна обучающая выборка период с 27.06.2005 по 09.02.2006 и две экзаменационной выбор-

ки: экзаменационная выборка 1 – с 02.11.2004 по 01.04.2005; экзаменационная выборка 2 – с 28.02.2006 по 30.05.2006.

### Результаты оптимизации ТС на множестве обучающих данных

В результате решения поставленной оптимизационной задачи на множестве обучающих данных были получены значения целевой функции, функции ограничений, а также значения всех локальных критериев для всех возможных сочетаний параметров ОРТ1 и ОРТ2. В процессе поиска были отобраны несколько вариантов ТС, которые не превысили граничное значение функции ограничения, а также удовлетворили инвестора по критерию доходности.

В результате тестирования отобранных вариантов ТС на экзаменационных выборках лучшим решением оказался следующий вариант: ОРТ1=35 ОРТ=75.

При данных параметрах ТС наиболее устойчива и на обеих экзаменационных выборках приводит к результатам, удовлетворяющим требованиям инвестора.

Таблица 2 – критерии качества ТС Stochastic – 20/80, полученные на экзаменационных выборках:

Период выборки	$V_1$	$V_4$	$V_7$	$V_9$	$V_{11}$	$V_{13}$	$V_{18}$	$V_{19}$
02.11.2004 – 01.04.2005	1.81%	36.67%	6.15%	57%	43%	2.86	3	17178.80
28.02.2006 – 30.05.2006	0.41%	34.28%	3.80%	75%	25%	1.67	1	8170.30

### Общая характеристика Инвестор 2

Общая характеристика инвестиционной стратегии. Срок вложения денежных средств не менее 1 года; доступные инструменты – акции российских эмитентов; минимальный объем вложений 10 000\$ (в течение инвестиционного периода возможны дополнительные вложения); требуемая доходность – выше 50%; максимально возможные потери – не более 30%.

*Характеристики используемой ТС:* в основу ТС заложены два технических индикатора - стохастический осциллятор (Stochastic) и индикатор скользящее среднее (Moving Averages). ТС называется - Stochastic and Moving Averages Trading System. Оптимизация и проверка качества ТС проводилась, как и в предыдущем примере, на акциях компании «АЭРО-ФЛОТ».

*Правила открытия позиции:* открытие длинной позиции – в случае когда значение индикатора Stochastic сначала опустится ниже определенного уровня ОРТ1, а затем поднимется выше уровня ОРТ2 или скользящее среднее за ОРТ3 периодов будет больше, чем скользящее среднее ОРТ4 периодов.

*Открытие короткой позиции:* в случае, когда значение индикатора Stochastic сначала поднимется выше определенного уровня ОРТ2, а затем опустится ниже уровня ОРТ2 или скользящее среднее за ОРТ3 периодов будет меньше, чем скользящее среднее ОРТ4 периодов.

*Правила закрытия позиции:* закрытие длинной позиции – в случае, когда значение индикатора Stochastic опустится ниже определенного уровня ОРТ1 или скользящее среднее за ОРТ3 периодов будет меньше, чем скользящее среднее ОРТ4 периодов.

*Закрытие короткой позиции:* в случае, когда значение индикатора Stochastic поднимется выше определенного уровня ОРТ2 или скользящее среднее за ОРТ3 периодов будет больше, чем скользящее среднее ОРТ4 периодов.

*Правила управления рисками:* уровень принудительного закрытия позиции с фиксацией убытка (Stop Loss) – 5% от цены приобретения актива. Уровень закрытия позиции с фиксацией прибыли (Take Profit) – 15% от цены приобретения актива.

*Правила управления капиталом* – отсутствуют.

Переменные состояния ТС (оптимизационные переменные): OPT1, OPT2, OPT3, OPT4.

#### Постановка оптимизационной задачи

*Критерии качества ТС:* в результате диалога с инвестором был выбран ряд критериев, в наибольшей степени его интересующих, и значения которых он хотел бы улучшать и контролировать:  $V_1, V_4, V_5, V_{13}, V_{20}$ .

*Оптимизируемые параметры:* OPT1, OPT2, OPT3, OPT4. Переменные должны удовлетворять следующим условиям:  $0 < OPT1 \leq 50$ ;  $50 < OPT2 \leq 95$ ;  $3 < OPT3 \leq 18$ ;  $10 < OPT3 \leq 100$ . Величина шага для OPT1 и OPT2 равна пяти, для OPT3 и OPT4 одному и десяти соответственно.

*Метод оптимизации:* метод деформируемых конфигураций с произвольным симплексом.

*Алгоритм поиска лучшей ТС:* Алгоритм 4 – Поиск оптимальной торговой системы в условиях отсутствия целевой функции в явном виде.

*Правило останова:* решение о прекращении поиска принимает ЛПР.

*Объем обучающей и экзаменационной выборки:* объем и структура обучающей и экзаменационных выборок совпадает с приведенными в прошлом примере.

#### Результаты поиска оптимальной торговой системы для Инвестора 2

В результате решения поставленной задачи были получены несколько вариантов реализаций ТС, которые, во-первых, удовлетворили ЛПР по значениям критериев качества, во-вторых, прошли успешное тестирование на двух экзаменационных выборках.

ЛПР в процессе работы диалогового алгоритма вел поиск лучшего решения в трех разных направлениях: ТС с лучшим критерием доходности  $V_4$ , ТС с лучшим отношением среднего дохода в сделки и среднего убытка –  $V_{13}$ , а также ТС с минимальным временем «присутствия» на рынке –  $V_{20}$ . В каждом из направлений были введены ограничения на основные критерии риска. В таблице 3 приведены выбранные ЛПР решения.

Таблица 3 – Критерии качества Stochastic and Moving Averages Trading System, полученные на экзаменационных выборках:

Оптимизируемые параметры				$V_1$	$V_4$	$V_5$	$V_{13}$	$V_{20}$
<i>Экзаменационная выборка 1 – с 02.11.2004 по 01.04.2005</i>								
OPT1	OPT2	OPT3	OPT4					
10	65	6	40	12.12%	86.40%	1.21	1.82	<b>34%</b>
35	65	12	30	24,70%	<b>110.71%</b>	1.55	2.35	43%
25	95	3	20	18.35%	84.92	1.18	<b>4.93</b>	76
<i>Экзаменационная выборка 2 – с 28.02.2006 по 30.05.2006</i>								
10	65	6	40	14.35%	79.14%	1.35	1.92	<b>27%</b>
35	65	12	30	29.11%	<b>107.45%</b>	1.19	2.46	43%
25	95	3	20	22.13%	86.16%	1.23	<b>5.01</b>	64%

Предложенный диалоговый алгоритм позволил инвестору сформировать набор наиболее важных для него критериев оценки качества ТС, а также вести поиск оптимального для него решения по разным направлениям и получить на выходе несколько вариантов реализаций торговой системы, каждый из которых оптимален по выбранному ЛПР критерию.

Далее, в зависимости от ситуации на рынке и поставленных целей, инвестор может использовать одно из полученных решений или их комбинации.

Приведенные в главе 4 примеры показали эффективность применения разработанных в работе алгоритмов решения многокритериальной задачи поиска и выбора оптимальной торговой системы.

### **Основные результаты и выводы.**

В диссертации предложены методы формализации качества торговой системы, алгоритмы оптимизации торговых систем, ориентированные на активное использование в диалоговом режиме представлений ЛПП о качестве решений. Получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Предложена обобщенная формальная модель торговой системы. Приведена содержательная постановка задачи оптимизации торговой системы.

2. Приведено формальное описание критериев качества торговой системы. Сформулированы однокритериальные и многокритериальные постановки задач поиска эффективной торговой системы.

3. Разработаны автоматические (с заданной целевой функцией) и диалоговые алгоритмы оптимизации торговых систем.

4. Разработанные алгоритмы и методы составили основу подсистемы оптимизации и оценки качества торговой системы в информационной системе Egat Focus.

5. Разработанные алгоритмы показали свою работоспособность и эффективность при решении задачи оптимизации ТС для инвесторов с разными инвестиционными целями и предпочтениями.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Рыков А.С., Михайлова Н.В., Шахназарян А.А. Построение функции полезности инвестора. Труды конференции «Современные сложные системы управления», Воронеж, 2003, с. 55-58.

2. Рыков А.С., Шахназарян А.А., Рыков А.А. Многокритериальная оценка и оптимизация портфеля ценных бумаг с использованием нечеткого описания. Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'2004, Москва, CD, Институт проблем управления. М., 2004, с. 1020-1033.

3. Рыков А.С., Шахназарян А.А. Многокритериальный выбор торговой системы. Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'2005, Москва, CD, Институт проблем управления. М., 2005, с. 1656-1664.

4. Рыков А.С., Шахназарян А.А. Многокритериальная оптимизация торговых систем. // Сб. Теория активных систем. Труды международной научно – практической конференции, М.: ИПУ РАН, 2005, с.66-67.

5. Рыков А.С., Шахназарян А.А. Многокритериальная оптимизация торговых систем. Труды V международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'2006, Москва, CD, Институт проблем управления. М., 2005, с. 519-548.

6. Рыков А.С., Шахназарян А.А. Конструирование и многокритериальная оптимизация торговых систем. Третья международная конференция по проблемам управления, Тезисы докладов, Том 1, М.: Институт проблем управления, 2006, с.176.

7. Рыков А.С., Шахназарян А.А. Многокритериальная оптимизация торговых систем. Журнал «Системы управления и информационные технологии», № 2.1, 2006, с. 121-126.