

На правах рукописи



Абухания Амер Ю. А.

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ
РАСПИСАНИЙ ЗАНЯТИЙ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (техника и технологии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новочеркасск 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор
Иванченко Александр Николаевич

Официальные оппоненты – **Курейчик Владимир Викторович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет», заведующий кафедрой «Системы
автоматизированного проектирования»

Кобак Валерий Григорьевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Донской государственный
технический университет», профессор кафедры
«Программное обеспечение вычислительной
техники и автоматизированных систем»

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ростовский государственный
университет путей сообщения»

Защита состоится «21» июня 2016 г. в 12:30 часов на заседании
объединенного диссертационного совета Д 999.064.02 на базе Южно-
Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени
М.И. Платова и Южного федерального университета по адресу: 346428,
Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, ауд. 149

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-
Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени
М.И. Платова» и на сайте <http://www.npi-tu.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Иванченко Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача составления расписания учебных занятий вуза (University Course Timetabling Problem – UCTP) является типичной проблемой, с которой постоянно сталкиваются все университеты мира. Она привлекает внимание математиков и ИТ-специалистов уже достаточно продолжительное время и к настоящему времени сделано большое количество постановок этой задачи, имеющих разную степень строгой математической формализации, предложены различные методы и алгоритмы решения UCTP и разработаны многочисленные информационные системы «Расписание», в том числе и представленные на рынке коммерческие системы. Актуальность поиска эффективных методов и алгоритмов решения UCTP подтверждается фактом проведения с 2002 г. международных соревнований по этой проблематике (International Timetabling Competition). Третье по счету такое соревнование (ITC2011) проводилось в 2011–2012 гг. и на нем было представлено 35 участников из 10 стран.

Существует огромное количество работ по тематике UCTP и неослабевающий интерес исследователей к этой задаче. Можно констатировать, что на сегодняшний день отсутствуют общепризнанные и неоспоримые модели, методы и алгоритмы в этой области прикладной математики и продолжение исследований в направлении построения оптимальных расписаний по-прежнему стоит в повестке дня.

Проблеме автоматического составления оптимальных расписаний занятий посвящены многочисленные диссертационные исследования в России (Лопатеева О.Н., Маслов М.Г., Галузин К.С., Низамова Г.Ф., Милехина Т.В., Асвад Фирас М. и др.) и за рубежом (R. Lewis, M. Marte, H. Larget, M.T. Jensen, C. Mihaila и др.)

Количество публикаций в периодических изданиях и трудах конференций по данной тематике исчисляется тысячами. Для решения UCTP предлагают использовать: классические методы (теория графов, целочисленное линейное программирование); метаэвристические (эволюционные и генетические алгоритмы, метод имитации отжига - simulated annealing, табу-поиск - tabu search, метод муравьиных колоний - ant colony optimization, максиминная муравьиная система – max-min ant system, оптимизация роем частиц - particle swarm optimization); мультиагентные системы; метод решения по прецедентам.

Отсутствие универсальных постановок UCTP, имеющих высокую степень математической строгости и учитывающих последующую компьютерную реализацию делает актуальной построение модели UCTP с максимально возможным учетом ограничений, требований и пожеланий к расписанию на основе сегодняшних реалий организации учебного процесса в вузах, использующей наряду (параллельно) с математической нотацией другие нотации, принятые в компьютерных науках – реляционные отношения и формальные языки программирования.

Заслуживает внимание идея гибридизации (совместного использования) различных методов и алгоритмов при построении общей схемы решения УСТР. Как показал обзор публикаций, наиболее подходящими “кандидатами” для гибридизации являются эвристические алгоритмы последовательной (пошаговой) локальной оптимизации, базирующиеся на идее “жадных” алгоритмов и специализированные версии генетического алгоритма, используемые как для поиска локального оптимума, так и для управляемого перебора вариантов (последовательностей) множества сущностей (учебных единиц), размещаемых в сетке расписания.

В постоянном развитии находится рынок автоматизированных систем составления расписаний занятий, игроками на котором являются даже такие «киты» ИТ-индустрии, как фирма «1С» со своей разработкой «1С: Автоматизированное составление расписания. Университет». Верхние строчки мировых рейтингов занимают также такие зарубежные разработки, как Lantiv Scheduling Studio 7 (Израиль) и OROLOGIO 13.x (Греция).

Все это свидетельствует об актуальности проведения теоретических и прикладных исследований по тематике УСТР, а также построению эффективных компьютерных реализаций разрабатываемых методов и алгоритмов.

Диссертационная работа выполнена в рамках научного направления ЮРГПУ (НПИ) «Теория, принципы и технологии построения информационно-вычислительных и измерительных систем» (утверждено решением ученого совета университета от 20.09.2011 г.)

Целью диссертационной работы является разработка и исследование математических, информационных и алгоритмических моделей, а также методов, алгоритмов, программных модулей и комплексов для решения задачи автоматического построения квазиоптимальных расписаний учебных занятий.

Задачи диссертационной работы:

1) На основе системного анализа выполнить формализацию задачи составления расписания занятий с учетом требований и пожеланий, отражающих реальные условия планирования и организации учебной деятельности вузов. При формализации и построении модели использовать не только общепринятую математическую (теоретико-множественную) нотацию, но и нотации, используемые в компьютерных науках.

2) Обосновать разделение жестких ограничений, устанавливающих физическую реализуемость расписания, на статические, которые можно учесть до составления расписания и динамические, которые должны проверяться в процессе составления расписания. Разработать алгоритмы, программные модули и структуры данных для проверки жестких ограничений, снижающие вычислительные затраты на реализацию основных циклов поиска оптимального расписания за счет максимально возможной априорной обработки исходных данных.

3) Обосновать интегральный критерий качества расписания, составляющими которого являются количественные оценки меры нарушения мягких ограничений, «взвешенные» нормирующими множителями. Реализовать в виде завершеного программного модуля алгоритм оценки качества расписания, допускающий его использование на различных этапах решения оптимизационной задачи составления расписания.

4) Сформулировать задачу последовательной локальной оптимизации расписания; разработать и программно реализовать алгоритм ее решения, основанный на гибридизации «жадного» и генетического алгоритмов.

5) Разработать и реализовать общий алгоритм построения квазиоптимального расписания с использованием схемы двойной гибридизации, предусматривающей внешний контур поиска оптимальной перестановки учебных единиц с использованием генетического алгоритма и внутренний контур поиска оптимального размещения для каждой учебной единицы в процессе последовательной локальной оптимизации.

6) Разработать и реализовать вычислительное ядро программного комплекса построения расписаний, содержащее программную реализацию «жадного» и генетического алгоритмов, с использованием парадигм обобщенного и объектно-ориентированного программирования.

7) Разработать общую структуру программного комплекса построения расписаний с использованием концепции многозвенной архитектуры и реализовать серверную часть на базе современных программных платформ.

Методы исследования. В работе использованы: методы системного анализа, методы математического моделирования, теория графов, теория реляционных отношений, структуры и базы данных, методы поисковой оптимизации, эволюционные и генетические алгоритмы, методы обобщенного и объектно-ориентированного программирования, методы построения многозвенных программных приложений с веб-интерфейсом. Для практической реализации результатов исследований использованы: сервер баз данных Microsoft SQL Server, веб-сервер IIS, технологии ASP.NET и ADO.NET, фреймворк MVC, среда разработки Visual Studio, а также языки программирования C++ и C#.

Достоверность научных результатов и выводов подтверждается корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, корректным применением известных теоретических положений, методов и алгоритмов, устойчивой работой разработанного программного обеспечения и результатами численных экспериментов на модельных примерах.

Объектом исследования являются процессы обработки информации и принятия решений при составления расписаний учебных занятий для вузов.

Предметом исследования являются математические модели, методы, алгоритмы и программные комплексы, ориентированные на обработку

информации и построение квазиоптимальных расписаний учебных занятий для вузов.

Тематика работы соответствует п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 5 «Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» и п. 8. «Теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ сложных систем» паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные и практические результаты:

– предложена новая методика выполнения системного анализа и формализации задачи составления расписания занятий, основанная на совместном использовании трех взаимодополняющих нотаций: теоретико-множественной, информационной (реляционной) и формально-языковой, что позволяет одновременно с формализацией выполнять компьютерную реализацию моделей и задач благодаря синергетическому эффекту от сочетания строгости и утилитарности этих нотаций;

– впервые разработан комплекс математических, информационных и алгоритмических моделей задачи составления расписания занятий, отличающийся от известных высокой гибкостью, взаимосогласованностью моделей, максимальным учетом современных подходов к организации учебного процесса, модульной структурой и конструктивностью;

– предложена оригинальная схема структуризации и обработки информации задачи составления расписания занятий, отличающаяся от известных новыми алгоритмами априорной обработки исходных данных, позволяющими значительно снизить вычислительные затраты на реализацию основных циклов поиска оптимального решения;

– впервые разработан и программно реализован алгоритм последовательной локальной оптимизации расписания, базирующийся на идее гибридизации «жадного» и генетического алгоритмов;

– впервые предложен и программно реализован общий алгоритм построения квазиоптимального расписания с использованием схемы двойной гибридизации, предусматривающей внешний контур поиска оптимальной перестановки учебных единиц с использованием генетического алгоритма и внутренний контур поиска оптимального размещения для каждой учебной единицы в процессе последовательной локальной оптимизации;

– предложен и теоретически обоснован новый генетический оператор скрещивания для решений, кодируемых перестановками, что позволяет в одном цикле получать множество «потомков» и открывает новые возможности для совершенствования генетических алгоритмов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) методика формализации сложных задач дискретной оптимизации, основанная на совместном использовании трех различных нотаций: теоретико-множественной, реляционной и формально-языковой, что позволяет одновременно строить математическую, информационную и алгоритмическую модели задачи;

2) математическая, информационная и алгоритмическая модели задачи составления расписания занятий;

3) метод и алгоритм решения задачи составления расписания занятий, использующий схему двойной гибридизации для генетического и «жадного» алгоритмов;

4) модификации генетических операторов скрещивания и мутации;

5) реализация вычислительного ядра программного комплекса с использованием парадигм обобщенного и объектно-ориентированного программирования.

Теоретическая ценность работы.

Ценность научных работ состоит в том, что предложен, научно обоснован и практически реализован оригинальный комплекс математических, информационных и алгоритмических моделей задачи составления расписания занятий. Предложен и программно реализован набор алгоритмов обработки информации при решении задачи построения оптимального расписания, сокращающих вычислительные затраты и использующих схему двойной гибридизации, базирующуюся на сочетании «жадного» и генетических алгоритмов.

Практическая ценность работы.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на основе разработанных методов и алгоритмов создано специальное программное обеспечение – вычислительное ядро программного комплекса «Расписание», базирующееся на парадигмах обобщенного и объектно-ориентированного программирования и обеспечивающее высокую надежность и производительность в создании прикладных программных приложений за счет повторного использования кода. С использованием концепции трехзвенной архитектуры разработан веб-ориентированный программный комплекс «Расписание», позволяющий удовлетворять информационные запросы пользователей с использованием ими простейших программных средств – веб-браузеров; входящая в комплекс программа «Серверное программное обеспечение для автоматизации работы с расписаниями занятий», зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2014616666).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в высших учебных заведениях Ирака (Al-Furat Al-Awsat Technical University, Babylon Technical Institute) при составлении

расписаний занятий, а также на факультете информационных технологий и управления ЮРГПУ (НПИ) при реализации магистерских программ и программ обучения в аспирантуре по направлениям подготовки 09.04.01, 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.04.04 «Программная инженерия».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертации излагались на научно-технических конференциях:

– II Международная научная конференция преподавателей, аспирантов, магистров и студентов вузов «Наука. Образование. Культура: вклад молодых исследователей» (г. Новочеркасск, ЮРГПУ(НПИ), 23-24 апреля 2013 г.)

– Международные научно-практические конференции «Теория, методы проектирования, программно-техническая платформа корпоративных информационных систем» (г. Новочеркасск, ЮРГПУ(НПИ), 2014 и 2015 гг.)

– "The first international conference of Information Technology In Yemen" / Saba Journal of Information Technology and Networking (SJITN) is a peer-reviewed international journal, published under the Faculty of Computer and Information Technology at Saba University in Yemen (Sana'a, 2014)

Кроме того, результаты диссертационного исследования регулярно размещаются для обсуждения на персональной странице автора на Интернет-площадке «Социальная сеть для учёных» (<https://npi-tu.academia.edu/AmEr>).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе: 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 4 публикации по результатам международных и всероссийских научно-практических конференций.

Структура диссертации. Диссертация содержит 158 страниц основного текста, 33 рисунка, 7 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 137 наименований и 5 приложений объемом 73 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи работы. Представлены положения, выносимые на защиту, апробация работы и структура диссертации.

В первой главе «Обзор и анализ моделей, методов и программных комплексов для составления расписаний занятий» выполнено неформальное описание задачи составления расписания занятий для вуза, а также представлен обзор и анализ существующих математических моделей данной задачи, применяемых методов ее решения и программных комплексов, используемых в практике работы вузовских диспетчеров. В выводах к главе 1 дается постановка задач исследования.

Во второй главе «Системный анализ, построение математической и информационной моделей задачи составления расписаний занятий» с позиций системного анализа исследуются основные объекты (сущности) УСТР, выполняется их формализация и реализация компьютерных моделей. Отмечается, что деятельность любого вуза включает множество процессов различных видов, использующих общие ресурсы и образующих определенную иерархию, на нижнем уровне которой находятся учебные занятия – «элементарные процессы» (ЭП), представляющие собой совокупность взаимосвязанных ресурсов и деятельности, привязанных к определенному временному интервалу. При формализации объектов (сущностей) «ресурс», «временной интервал», «деятельность» и «расписание» предложено использовать параллельно три взаимодополняющие нотации: математическую, реляционную и формально-языковую.

Сущность «ресурс» представляет аудиторный фонд вуза – множество учебных аудиторий $A = (a_i, i \in [1:|A|])$. При этом каждому скалярному индексу i соответствует мультииндекс (i_0, i_1, i_2, i_3) , в котором: $i_0 \in [1:|B|]$ – номер учебного корпуса в кампусе университета, B – множество учебных корпусов, $i_1 \in [1:|A_{i_0}|]$ – номер аудитории в учебном корпусе b_{i_0} , A_{i_0} – множество аудиторий в учебном корпусе b_{i_0} , $i_2 \in [1:|C|]$ – индекс вместимости аудитории (например, аудитория на 25, 50 или 100 человек), C – множество типов аудиторий по вместимости, $i_3 \in [1:|R|]$ – код назначения (роли) аудитории (например, лекционная, компьютерный класс, лаборатория электроники и т.п.), R – множество ролей аудиторий.

С использованием языка реляционных отношений Tutorial D сущность «ресурс» описывается так (здесь реляционные отношения BCR, TCRC, TCRU и CR представляют соответственно учебные корпуса, виды аудиторий по вместимости, виды аудиторий по назначению и аудитории):

```
VAR BCR BASE RELATION {Nb INTEGER, Name CHAR} PRIMARY KEY {Nb};
VAR TCRC BASE RELATION {Ntcrc INTEGER, MaxCap INTEGER, Name CHAR}
PRIMARY KEY {Ntcrc};
VAR TCRU BASE RELATION {Ntcru INTEGER, Name CHAR} PRIMARY KEY {Ntcru};
VAR CR BASE RELATION {Ncr INTEGER, Nb INTEGER, Nc INTEGER, Ntcru
INTEGER, Ntcrc INTEGER, Name CHAR, Capacity INTEGER} PRIMARY KEY {Ncr},
FOREIGN KEY {Nb} REFERENCES BCR, FOREIGN KEY {Ntcru} REFERENCES TCRU,
FOREIGN KEY {Ntcrc} REFERENCES TCRC;
```

Формально-языковая нотация описания сущностей использует язык программирования C++. Например, реляционное отношение CR (аудитории) представлено вектором:

```
vector<tuple<int,int,int,int,int,string,int>> CR;
```

При формализации сущности «временной интервал» вводятся основные понятия: таймслот (учебная пара) и период планирования (одна или две недели) – множество таймслотов, а также вспомогательные: неделя, день недели и номер учебной пары в пределах дня.

Сущность «*деятельность*» (иначе – «*учебная единица*») интегрирует в себе три объекта: «*учебная группа*», «*учебное занятие*» и «*преподаватель*». Учебная группа – это множество обучаемых, которые на данном периоде планирования зафиксированы как единое целое и всегда в этом составе посещают определенный вид занятий определенной учебной дисциплины. На множестве учебных групп $G = (g_i, i \in [1: |G|])$ существует N-арное отношение агрегации, представляемое ориентированным ациклическим графом $\Gamma_H = (G, R_H)$, множество дуг которого $R_H \subset G \times G$ отображает бинарное отношение типа “is-part-of” («является частью», «входит в состав»). В качестве агрегатов выступают потоки, которые включают академические группы и академические группы, которые включают подгруппы. Пример такого графа представлен ниже на рис. 1. Ориентированный ациклический граф Γ_H можно считать состоящим из пересекающихся ориентированных сильноветвящихся деревьев, корнями которых являются подгруппы или академические группы. Граф может содержать изолированные узлы.

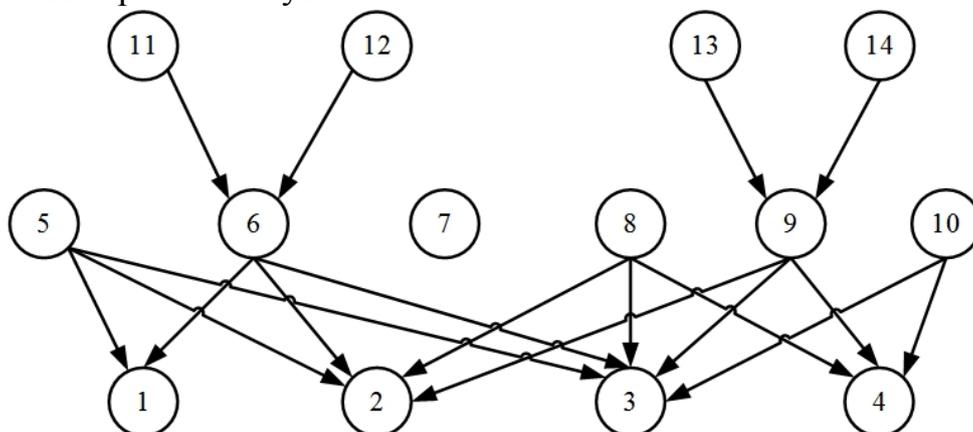


Рисунок 1 – Пример задания отношения агрегации в виде графа структурной иерархии типа “is-part-of”

При построении расписания важно знать все учебные группы, в которые входит данный студент. Множество таких групп (*кластер*) образует связный подграф графа Γ_H , имеющий вид ориентированного сильноветвящегося дерева, корнем которого является входной узел графа Γ_H с нулевой полустепенью захода. Изолированные узлы образуют самостоятельные кластеры. Группа, соответствующая корню такого дерева, входит во все группы – вершины дерева, а две любые группы одного кластера обязательно имеют пересечение по студентам. Разработаны алгоритмы, позволяющие сформировать кластеры. Первый из них строит на множестве G симметричное отношение S -конкурентности (S -конкурентные группы имеют пересечение по студентам), а второй – формирует отношение «многие-ко-многим» между кластерами и учебными группами.

Сущность «*расписание*» - это некоторое однозначное отображение S из множества U во множество (декартово произведение) $T \times A$, ставящее в

соответствие каждой учебной единице упорядоченную пару «таймслот, аудитория»:

$$S: U \rightarrow T \times A,$$

Процесс размещения учебной единицы в сетке расписания $C = T \times A$ схематично представлен на рис. 2.

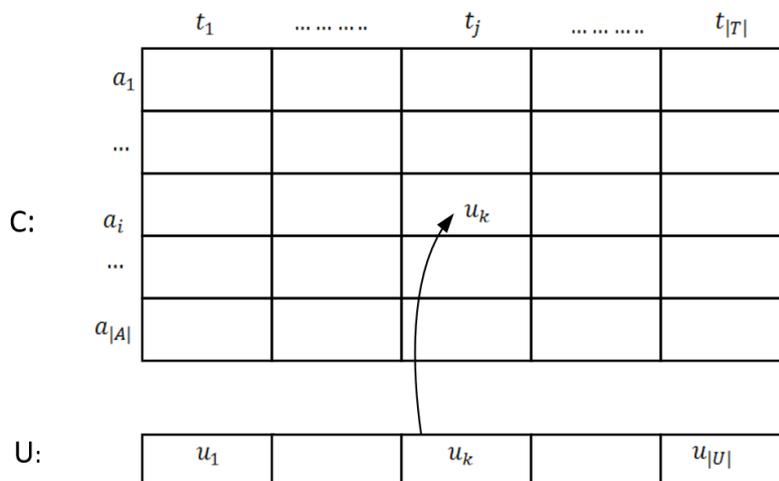


Рисунок 2 – Размещение учебной единицы в сетке расписания

Допустимым (реализуемым) считается расписание, удовлетворяющее ряду требований (жестких ограничений), в числе которых рассматриваются:

1. Доступность аудиторий (каждая аудитория имеет график недоступности, запрещающий ее использование в определенные таймслоты).
2. Совместимость учебных единиц и аудиторий (для каждой учебной единицы существует список допустимых аудиторий).
3. Доступность преподавателей (преподаватель имеет «график присутствия», показывающий, что в определенные таймслоты он находится вне вуза).
4. Совместимости двух учебных единиц u_i и u_j (каждый студент и каждый преподаватель может участвовать только в одном элементарном процессе в одном таймслоте).
5. Достижимость аудиторий (две аудитории, назначаемые в расписании в смежных таймслотах, должны быть «достижимы» по времени перехода по отношению к преподавателю или студентам).

Предложено разбить эти ограничения на две группы: статические, которые можно учесть априори, до составления расписания, и динамические, которые можно проверить, когда уже имеется расписание, либо в процессе составления расписания. Для учета статических жестких ограничений разработаны и реализованы: алгоритм формирования сетки расписания и алгоритм построения списка допустимых ячеек сетки для учебной единицы. Для упрощения проверки динамических жестких ограничений в процессе составления расписания разработаны и реализованы: алгоритм установления

отношения Т-конкурентности учебных единиц (запрет на размещение в одном таймслоте) и алгоритм определения удаленности аудиторий (невозможность перехода между аудиториями).

Следующим этапом формализации является анализ пожеланий к качеству расписания (мягких ограничений), собранных в 3 группы: 1) общие пожелания (желательно планировать лекции в начале рабочего дня; количество избыточных мест в аудитории не должно быть большим), 2) пожелания к расписанию конкретного преподавателя (количество учебных занятий в день, проводимых преподавателем, не должно превышать заданного значения, расписание преподавателя не должно иметь «окон», желательно отсутствие «переходов» между учебными корпусами для смежных таймслотов) и 3) пожелания к расписанию конкретного студента (количество учебных занятий в день, на которых должен присутствовать студент, не должно превышать заданного значения, расписание студента не должно иметь «окон», желательно отсутствие «переходов» между учебными корпусами для смежных таймслотов).

В завершение построения модели УСТР сформулирован критерий качества расписания как аддитивная свертка 8 частных критериев (по числу мягких ограничений) с нормирующими коэффициентами:

$$F(S) = \sum_{i=1}^8 \frac{F_i(S)}{\bar{F}_i}$$

Каждый из частных критериев оценивает степень нарушения соответствующего ограничения, а целью нормирования является стремление сделать значения частных критериев соизмеримыми (в идеале – привести их диапазону [0-1]). Предложены расчетные соотношения и построены алгоритмические конструкции для частных критериев. Для подсчета величины общего критерия разработана и реализована функция на языке C++, которая используется далее при построении оптимального расписания.

В третьей главе «Методы и алгоритмы составления расписаний занятий на основе генетического алгоритма» приводится общая схема решения УСТР, эвристический алгоритм построения допустимого расписания и его усовершенствования, направленные на получение наилучшего расписания. Показано, что мощность множества расписаний равна (здесь где $n = |U|$ и $m = |C|$):

$$\binom{m}{n} n! = \frac{m!}{(m-n)!}$$

что позволяет с уверенностью отнести УСТР к классу комбинаторных NP-полных задач.

Разработан и реализован эвристический алгоритм построения допустимого расписания путем последовательного размещения учебных единиц в сетке расписания с использованием механизма случайного выбора допустимой ячейки сетки на каждом шаге и пересчета списков допустимых

ячеек для еще не обработанных учебных единиц с учетом динамических жестких ограничений.

На основе этого алгоритма разработан гибридный эвристический алгоритм последовательной локальной оптимизации, сочетающий идею «жадных» алгоритмов и схему генетического алгоритма (ГА) для поиска наилучшего размещения учебной единицы на каждом шаге. В качестве фитнес-функции предложено использовать следующую оценку качества выбора ячейки сетки расписания на i -м шаге:

$$\Delta F_{opt}(u_i) = \min_{c \in C(u_i)} \sum_{k=1}^8 \frac{\Delta F_k(u_i, c | S_{i-1})}{\tilde{F}_k}$$

Выражение $\Delta F_k(u_i, c | S_{i-1})$ обозначает величину k -го частного критерия, рассчитанного для пары (u_i, c) при условии, что частичное расписание S_{i-1} уже сформировано.

В качестве фенотипа предложено использовать порядковый номер допустимой ячейки в списке допустимых ячеек, а в качестве генотипа – 32-битное двоичное представление этого номера. Это исключает необходимость кодирования/декодирования решений, но требует дополнительной проверки каждой новой хромосомы на допустимость. На рис. 3 представлена схема реализованного стандартного генетического алгоритма.

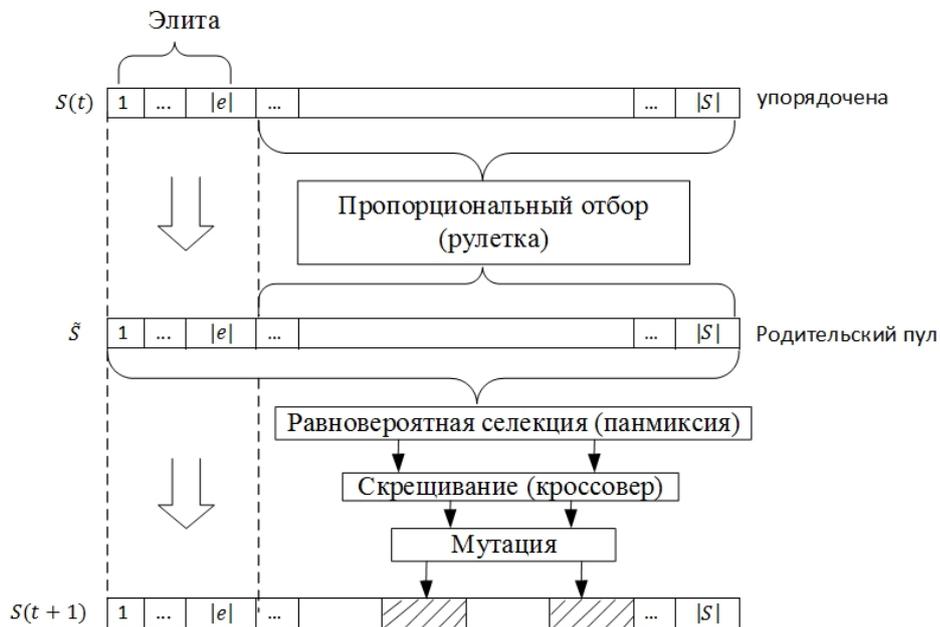


Рисунок 3 – Схема стандартного ГА

Разработанный эвристический алгоритм последовательной локальной оптимизации «упакован» в функцию $SLO()$, но вход которой поступает последовательность учебных единиц U , а возвращаемым значением является величина критерия качества построенного расписания. Само квазиоптимальное

расписание является «побочным эффектом» данной функции и оказывается размещенным в соответствующей структуре данных.

Далее предложено ввести в схему решения УСТР еще один – внешний контур оптимизации, на котором будет отыскиваться наилучшая последовательность учебных единиц, существование которой интуитивно предполагается. Для определения такой последовательности также используется ГА, в котором хромосомы кодируются перестановками (при этом фенотип и генотип опять совпадают – перестановка одновременно является и хромосомой, и решением задачи), а в качестве фитнес-функции выступает функция SLO(). Существование очевидных приоритетов «важности» определенных видов занятий приводит к необходимости мультихромосомного представления перестановки, при котором вся хромосома будет состоять из трех независимых секций (трех генов), первая из которых содержит все лекционные учебные единицы, вторая – все практические и семинарские занятия и третья – все лабораторные занятия (рис. 4). Генетические операторы применяются к каждой из секций в отдельности, не скрещивая эти части между собой, а значение фитнес-функции вычисляется для всей хромосомы в целом.

Гены	H_1^g				H_2^g				H_3^g			
Хромосома	8	11	...	3	17	2	...	21	5	41	...	38
Параметры	лекции				практ. занятия				лаб. занятия			
Фитнес-функция	$F^*(S)$											

Рисунок 4 – Структура мультихромосомы

Этот ГА реализован на основе улучшенной схемы классической модели Холланда (рис. 5). В алгоритме использованы как известные операторы скрещивания: частично отображающий (PMX), упорядочивающий (OX) и циклический (CX), так и новый кроссовер: полный циклический (FCX), основанный на использовании известного в теории перестановок алгоритма разложения перестановки на циклы. Применение этого алгоритма позволило получить новые результаты – показать, что от пары родительских хромосом-перестановок получается не два потомка, как это было известно ранее, а гораздо большее количество.

Таким образом, общий алгоритм решения УСТР реализует схему двойной гибридизации: центральную часть алгоритма составляет эвристический метод последовательной локальной оптимизации («жадный» алгоритм), «внутри» которого работает генетический алгоритм, отыскивающий наилучшее размещение в сетке расписания для очередной учебной единицы, а «снаружи» - также генетический алгоритм, отыскивающий наилучшую последовательность для множества учебных единиц.

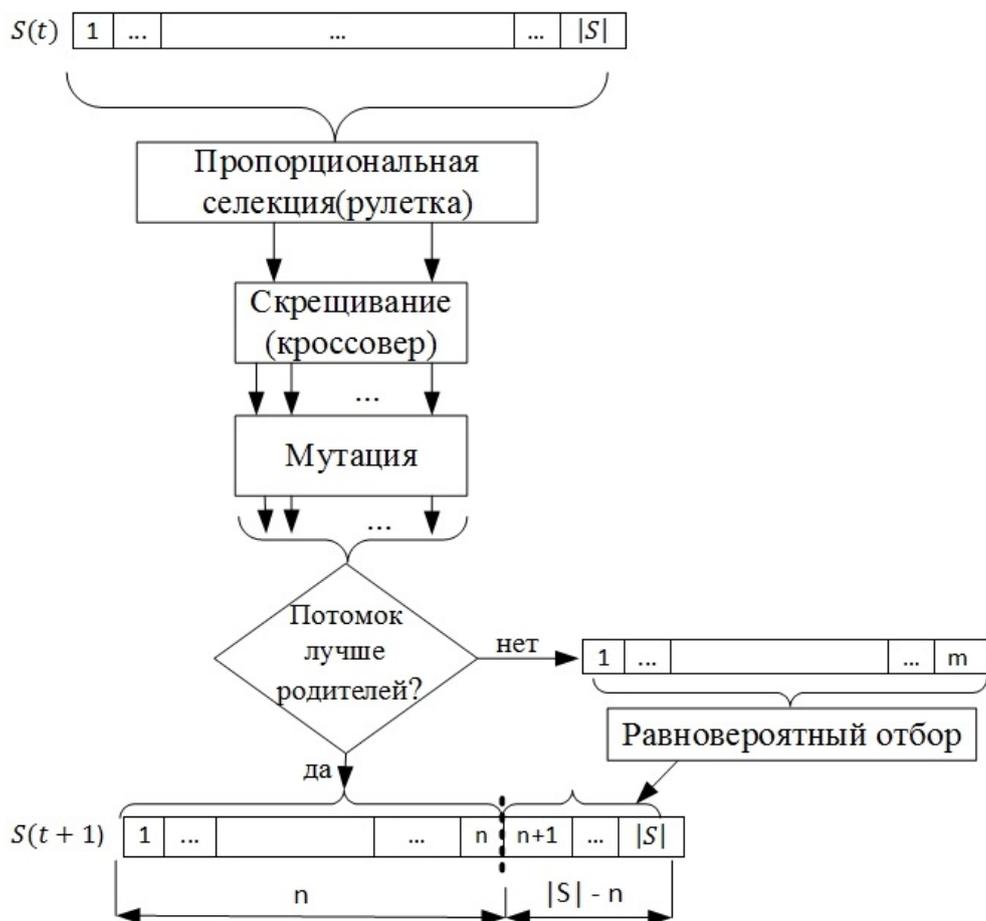


Рисунок 5 – Улучшенная схема классической модели Холланда

В четвертой главе «Веб-ориентированный программный комплекс «Расписание»» представлена общая архитектура программного комплекса (ПК) «Расписание», а также освещены вопросы реализации базы данных, серверной части и вычислительного ядра программного комплекса. В ней приводятся преимущества современной трехзвенной веб-ориентированной архитектуры корпоративных программных приложений, к которым можно отнести и ПК «Расписание». Большое внимание уделено практическим вопросам создания базы данных комплекса – приведены исходные коды SQL-скриптов для всех реляционных таблиц, разработанных во 2 главе. Для реализации интерфейсной части ПК «Расписание» предложено использовать современную технологию разработки веб-приложений – фреймворк ASP.NET MVC. Подробно описано объектно-ориентированное вычислительное ядро ПК «Расписание», реализующее все алгоритмы, разработанные в главах 2 и 3, основывающееся на парадигме обобщенного программирования и возможностях языка C++ и его стандартной библиотеки (в версии последнего стандарта C++14). Приводятся исходные коды для всех модулей вычислительного ядра, а также модулей серверной части.

В заключении излагаются основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены: исходные данные и результаты прогона алгоритмов решения УСТР для модельного примера; операторы кроссовера для хромосом, кодируемых перестановками; исходные коды программ; копии свидетельств о регистрации программ и копии документов об использовании результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1) Выполнена формализация задачи составления расписания занятий с использованием трех взаимодополняющих нотаций: теоретико-множественной, реляционной и формально-языковой, что позволило построить математическую, информационную и алгоритмическую модели задачи и получить синергетический эффект от сочетания строгости каждой из нотаций и комплексного решения проблем последующей компьютерной реализации моделей и задач как с использованием технологии баз данных, ориентированной на клиент-серверную архитектуру, так и с использованием структур данных в памяти компьютера, что характерно для настольных приложений или «толстых» клиентов.

2) Разработан эффективный алгоритм проверки жесткого ограничения «один и тот же студент не может в одно и то же время находиться на разных занятиях», требующий задания лишь минимально необходимых данных для представления N -арного отношения агрегации между сущностями «учебные группы» и допускающий максимальную гибкость в представлении групповой формы организации учебного процесса с учетом разбиения академических групп на подгруппы и произвольного формирования лекционных потоков из академических групп разных специальностей и факультетов. Выявлено, что N -арное отношение агрегации является альтернативным способом задания ориентированного ациклического графа, состоящего из пересекающихся ориентированных сильноветвящихся деревьев. Предложен оригинальный алгоритм перечисления (обхода) вершин сильноветвящегося дерева.

3) Впервые предложено разделять жесткие ограничения, устанавливающие физическую реализуемость расписания, на статические, которые можно учесть еще на подготовительном этапе (до составления расписания) и динамические, которые должны проверяться в процессе составления расписания. Разработаны алгоритмы, программные модули и структуры данных для проверки всех жестких ограничений, снижающие вычислительные затраты на реализацию основных циклов поиска оптимального расписания за счет априорной обработки исходных данных.

4) Предложен и разработан интегральный критерий качества расписания, являющийся важным инструментом оценки вариантов расписаний и выбора наилучшего варианта. Составляющими аддитивного интегрального критерия являются количественные оценки меры нарушения мягких ограничений, «взвешенные» нормирующими множителями. Реализован в виде завершеного

программного модуля (функции C++) алгоритм оценки качества расписания, допускающий его использование на различных этапах решения оптимизационной задачи составления расписания.

5) Разработан и реализован в виде функции C++ вероятностный эвристический алгоритм построения допустимого расписания путем последовательного размещения учебных единиц в сетке расписания и корректировки «на лету» вспомогательных структур данных с учетом динамических «жестких» ограничений.

6) Сформулирована задача последовательной локальной оптимизации расписания, разработан и программно реализован алгоритм ее решения, базирующийся на идее «жадных» алгоритмов и разработанном алгоритме построения допустимого расписания. Вместо случайного выбора допустимой ячейки для текущей учебной единицы производится выбор наилучшей, с точки зрения этой учебной единицы, ячейки. Для осуществления такого выбора сформулирован и реализован в виде функции языка C++ критерий оценки качества выбора ячейки сетки расписания, согласованный с аддитивным характером интегрального критерия качества. Процедуру выбора наилучшей ячейки предложено реализовать на базе стандартной схемы генетического алгоритма с бинарным кодированием решений (хромосом), не требующим выполнения сложных операций преобразования «фенотип-генотип» и «генотип-фенотип».

7) Предложена схема гибридизации алгоритмов для решения задачи составления расписания. Для управления локальной оптимизацией предложено ввести внешний контур оптимизации, на котором варьируются последовательности учебных единиц и отыскивается последовательность, дающая наилучшее решение задачи локальной оптимизации. Выбор наилучшей последовательности предложено реализовать на базе стандартной схемы генетического алгоритма с кодированием решений перестановками с мультихромосомным представлением. В результате общая схема решения задачи составления расписания приобрела вид «матрешки» из трех частей: внешняя – генетический алгоритм с кодированием решений перестановками (глобальный генетический алгоритм – ГГА), средняя – последовательная локальная оптимизация, базирующаяся на идее «жадных» алгоритмов и внутренняя – генетический алгоритм с бинарным кодированием решений (локальный генетический алгоритм – ЛГА).

8) Разработано вычислительное ядро ПК «Расписание» с использованием парадигм обобщенного и объектно-ориентированного программирования, содержащее программную реализацию ЛГА и ГГА. В основе иерархии классов предложено использовать два шаблонных класса, реализующих абстракции «хромосома» и «популяция». Предложены и программно реализованы модифицированные генетические операторы скрещивания и мутации. Разработанный полный циклический кроссовер основан на использовании

известного в теории перестановок алгоритма разложения перестановки на циклы. Применение этого алгоритма позволило получить новые результаты – показать, что от пары родительских хромосом-перестановок получается не два потомка, как это было известно ранее, а гораздо большее количество.

9) Предложена 3-звенная архитектура ПК «Расписание», обладающая значительными преимуществами перед «монолитными» приложениями и обеспечивающая удовлетворение информационных запросов всех заинтересованных пользователей с использованием ими простейших программных средств – веб-браузеров и разнообразных терминальных устройств. Для реализации функционала слоёв данных и бизнес-логики предложено использовать продукты мирового лидера – компании Microsoft: сервер баз данных Microsoft SQL Server, веб-сервер IIS, технологии ASP.NET и ADO.NET, фреймворк MVC, а также язык программирования C#.

10) Разработаны экранные формы организации диалога с пользователями и выполнена программная реализация серверной части ПК «Расписание» на языке программирования C# с использованием фреймворка для создания веб-приложений ASP.NET MVC. Разработаны и реализованы на языке Transact-SQL SQL-запросы (скрипты) для создания реляционных таблиц серверной БД ПК «Расписание» с учетом разработанной информационной модели.

11) Результаты диссертационной работы используются в высших учебных заведениях Ирака (Al-Furat Al-Awsat Technical University, Babylon Technical Institute) при составлении расписаний занятий. Отдельные материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова при реализации магистерских программ и программ обучения в аспирантуре по направлениям подготовки 09.04.01, 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.04.04 «Программная инженерия», 02.04.03 «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», 02.06.01 «Компьютерные и информационные науки», 01.04.04 «Прикладная математика». Основные положения и результаты диссертации были апробированы на 4 конференциях различного уровня, опубликованы в 7 основных печатных работах, в том числе в 2 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, что подтверждает результативность выполненных исследований.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих изданиях, рекомендованных ВАК

1. Иванченко, А.Н. О постановке задачи составления расписаний для вуза / А.Н. Иванченко, А.Ю. Абухания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. - 2012. № 6. - С. 9-13

2. Иванченко, А.Н. Информационная модель задачи составления расписаний для вуза / А.Н. Иванченко, А.Ю. Абухания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. - 2013. – № 3. – С. 14-16.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616666. Серверное программное обеспечение для автоматизации работы с расписаниями занятий / Абухания Амер Юсеф. – Дата поступления 06.05.2014. Дата регистрации 01.07.2014.

Публикации в сборниках научных статей, трудов и материалов конференций

4. Ivanchenko, A., Abuhania, A. Automatization of university timetabling problems. Saba Journal of Information Technology and Networking. Vol. 2, No. 1 (2014), pp. 28-34.

5. Abuhania, A. Survey on the methods schedule problems for university courses /A. Abuhania // Теория, методы проектирования, программно-техническая платформа корпоративных информационных систем : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 30 мая 2014 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2014. – С. 3-9.

6. Abu Hania, A. A Comparative Analysis of Crossover operators for solving multiple problems /A. Abu Hania // Теория, методы проектирования, программно-техническая платформа корпоративных информационных систем : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 28 мая 2015 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2015. – С. 3-11.

7. Абухания А.Ю. Веб – ориентированная информационная система «Расписание» /А.Ю Абухания // Наука. Образование. Культура: вклад молодых исследователей : материалы II Междунар. науч. конф. преподавателей, аспирантов, магистров и студентов вузов, г. Новочеркасск, , 23 – 24 апреля 2013 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. – С. 121-125.