

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

№ 4(5)/2013

Издается с 2012 года

РОССИЙСКИЙ ЖУРНАЛ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-48835 от 2 марта 2012 г.

Издатель:

ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная,
д. 31В, стр. 1
Тел.: (495) 380-05-40, 380-05-43
Факс: (495) 363-92-12
E-mail: books@infra-m.ru
http://www.infra-m.ru

Главный редактор:

Царьков И.Н., канд. экон. наук, доцент кафедры управления проектами Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)

Выпускающий редактор:

Чистякова А.И.

Отдел подписки:

Назарова М.В.
Тел.: (495) 363-42-60, доб. 249
e-mail: podpiska@infra-m.ru

© ИНФРА-М, 2013

Присланные рукописи не возвращаются.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов публикуемых материалов.

Редакция оставляет за собой право самостоятельно подбирать к авторским материалам иллюстрации, менять заголовки, сокращать тексты и вносить в рукописи необходимую стилистическую правку без согласования с авторами. Поступившие в редакцию материалы будут свидетельствовать о согласии авторов принять требования редакции.

Перепечатка материалов допускается с письменного разрешения редакции.

При цитировании ссылка на журнал «НИР. Российский журнал управления проектами» обязательна.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.

Подписано в печать 06.12.2013.

Формат 60×90/8. Бумага офсетная.

Тираж 1000 экз. Заказ №

САЙТ: www.naukaru.ru

E-mail: mag6@naukaru.ru

Содержание**МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ****Царьков И.Н.**

Исследование эффективности методов оптимизации проекта с ограниченными ресурсами. Часть 2..... 3

Нечаева И.М.

Внедрение скоростных методов строительства и зарождение управления проектами в СССР 14

Зуйков К.А.

Методы моделирования динамики систем управления проектами..... 25

**МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ
ПОРТФЕЛЯМИ, ПРОГРАММАМИ
И ПРОЕКТАМИ****Гергерт Д.В., Ежова Д.В.**

Модель формирования портфеля проектов в условиях неопределенности в компании строительной отрасли 37

**СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ****Багратиони К.А.**

Управление изменениями: факторы, влияющие на успех проекта..... 56

СОБЫТИЯ

Обзор докладов секций майской конференции «Молодежь и управление проектами в России».... 65

Правила предоставления статей в Российский журнал управления проектами 67

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Marek Wirkus — PhD, Associate Professor, Gdansk University of Technology

Stephen Hayes — Managing Director and Chief Executive International Center for Complex Project Management (ICCPM)

Аньшин Валерий Михайлович — д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой управления проектами НИУ ВШЭ

Владимирова Ирина Львовна — д-р экон. наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой управления проектами и программами Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова (РЭУ им. Плеханова)

Гергерт Дмитрий Владимирович — канд. экон. наук, доцент кафедры стратегического менеджмента НИУ ВШЭ (г. Пермь)

Демкин Игорь Вячеславович — д-р экон. наук, заместитель директора Центра анализа рисков ООО «НИИгазэкономика»

Ильина Ольга Николаевна — д-р техн. наук, доцент кафедры управления проектами НИУ ВШЭ

Колоколов Владимир Алексеевич — д-р экон. наук, профессор РЭУ им. Плеханова

Коссов Владимир Викторович — д-р экон. наук, профессор кафедры управления проектами НИУ ВШЭ

Моисеева Нина Константиновна — д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой маркетинга и управления проектами Национального исследовательского университета «МИЭТ» (НИУ МИЭТ)

Цветков Александр Васильевич — д-р техн. наук, генеральный директор ПМСОФТ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Marek Wirkus — PhD, Associate Professor, Gdansk University of Technology

Stephen Hayes — Managing Director and Chief Executive International Center for Complex Project Management (ICCPM)

Аньшин Валерий Михайлович — д-р экон. наук, профессор НИУ ВШЭ

Владимирова Ирина Львовна — д-р экон. наук, профессор РЭУ им. Плеханова

Гергерт Дмитрий Владимирович — канд. экон. наук, доцент НИУ ВШЭ (г. Пермь)

Дагаев Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент НИУ ВШЭ

Демкин Игорь Вячеславович — д-р экон. наук, заместитель директора Центра анализа рисков ООО «НИИгазэкономика»

Ильина Ольга Николаевна — д-р техн. наук, доцент НИУ ВШЭ

Колоколов Владимир Алексеевич — д-р экон. наук, профессор РЭУ им. Плеханова

Коссов Владимир Викторович — д-р экон. наук, профессор НИУ ВШЭ

Кузьмина Юлия Павловна — канд. экон. наук, доцент НИУ МИЭТ

Моисеева Нина Константиновна — д-р экон. наук, профессор НИУ МИЭТ

Мошкович Леонид Иосифович, канд. экон. наук, профессор, Сибирский федеральный университет

Фунтов Валерий Николаевич, доцент, д-р экон. наук, Санкт-Петербургский международный институт менеджмента (ИМИСП)

Цветков Александр Васильевич — д-р техн. наук, генеральный директор ПМСОФТ

Яковлева Анна Юрьевна — канд. экон. наук, старший преподаватель НИУ ВШЭ

CONTENTS

PROJECT MANAGEMENT METHODS AND INSTRUMENTS

Tsarkov I.N.

Evaluation Of Methods For Optimizing A Resource-Constrained Project. Part 2 3

Nechaeva I.M.

Adoption of Time-Saving Construction Methods and Emergence of Project Management in the USSR 14

Zuykov K.A.

Modeling of Project Management Systems Dynamics..... 25

PORTFOLIO, PROGRAMS AND PROJECTS MANAGEMENT METHODOLOGY

Gergert D.V., Ezhova D.V.

Model Of Creating Project Portfolio For A Construction Company In The Environment of Uncertainty..... 37

PSYCHOSOCIAL ASPECTS OF PROJECT MANAGEMENT

Bagrationi K.A.

Change management: factors affecting the project success 56

EVENTS

Review of reports of sections of the May conference «Young people and Management of Projects in Russia» 65

Regulations for providing of articles in Russian project management journal..... 67

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ

Исследование эффективности методов оптимизации проекта с ограниченными ресурсами. Часть 1

Evaluation of Methods for Optimizing a Resource-Constrained Project. Part 2

DOI: 10.12737/1958

Получено: 10 октября 2013 г. / Одобрено: 20 октября 2013 г. / Опубликовано: 12 декабря 2013 г.

И.Н. Царьков

Канд. экон. наук, доцент,
НИУ ВШЭ,
Россия, 105187, Москва, ул. Кирпичная, 33,
e-mail: igor_tsarkov@live.ru

I.N. Tsarkov

Candidate of Sciences (Econ.),
Associate professor at
National Research University Higher School of Economics
33 Kirpichnaya Ulitsa, Moscow, 105187 Russia,
e-mail: igor_tsarkov@live.ru

Аннотация

В работе исследуется эффективность различных однопроходных правил приоритета, используемых в конструктивных эвристических методах сокращения продолжительности проекта в условиях ограниченных возобновляемых ресурсов. Особое внимание уделено так называемым гибридным алгоритмам и зависимости эффективности правил приоритета от параметров сети. Эффективность правил приоритета анализируется на множествах из 480 проектов PSPLIB: J30, J60, J90.

Ключевые слова: эвристические методы, расписание проекта, ограниченные ресурсы, сокращение продолжительности, конструктивные методы, гибридные методы, WCS, IRSM, SLK, PSPLIB.

Abstract

Developing this subject, the author evaluates efficiency of various straight-through priority rules, used in constructive heuristic methods meant for reducing completion periods of projects with constrained renewable resources. Special attention is given to the so-called hybrid algorithms and dependence between efficiency of priority rules and network capacity. Efficiency of rules is analyzed based on sets of 480 PSPLIB projects: J30, J60, J90.

Keywords: heuristic methods, project schedule, constrained resources, to reduce completion period, constructive methods, hybrid methods, WCS, IRSM, SLK, PSPLIB.

1. Введение

По словам профессора школы менеджмента технического университета Мюнхена (TUM) Р. Колиша, ядром системы планирования проекта является механизм нахождения такого расписания, которое позволит выполнить проект в кратчайшие сроки в условиях ограниченных возобновляемых ресурсов. Действительно, в большинстве проектов не хватает или недостаточно много людей и машин, которым предстоит выполнять работы проекта, и неэффективное распределение этих ресурсов может существенно (на 20–30% и более) увеличить продолжительность такого проекта (см. приложения А, В, С). При этом классический метод критического пути (СРМ¹), являющийся на сегодня основным методом формирования расписаний проектов, не работает в условиях ограниченных ресурсов и поэтому не может обеспечить решение такой задачи.

В первой части статьи [1] были рассмотрены методы, позволяющие найти расписания с минимально возможной продолжительностью при ограниченных ресурсах, основным недостатком которых является практическая невозможность применения

даже для небольших проектов (порядка 200 работ). В этой работе будут рассмотрены методы, которые, скорее всего, не позволят получить оптимальное расписание, но могут быть реализованы в современных системах автоматизации и применяться на практике. Такие методы принято называть эвристическими.

Эвристические методы обычно делят на три класса: конструктивные, улучшающие и метаэвристические. К *конструктивным* относят методы, позволяющие «с нуля» построить расписание, в котором все ресурсные конфликты будут разрешены. Такие расписания мы будем называть допустимыми. *Улучшающие* методы нацелены на изменения уже существующего допустимого расписания, которые позволяют сократить продолжительность проекта. *Метаэвристические* методы позволяют выстроить процесс, который позволит последовательно улучшать расписание, объединяя в себе и конструктивные, и улучшающие методы.

Основная задача конструктивных эвристических методов состоит в определении величины, на которую нужно задержать выполнение каждой работы проекта, чтобы разрешить все ресурсные конфликты (получить допустимое расписание). Отправной точ-

¹ От англ. *Critical Path Method*.

кой для таких методов может служить расписание, полученное с помощью *СРМ*. Если последовательно разрешать ресурсные конфликты от первой работы к последней (задерживая выполнение некоторых работ), то мы получаем прямую схему формирования расписания. Если двигаться от последней работы к первой, то получаем обратную схему. Главный вопрос, который при этом возникает, заключается в определении работ, которые должны быть задержаны, и тех, которые должны выполняться без задержки. Это можно сделать путем присвоения приоритета для каждой работы проекта. Правила, по которым расставляются приоритеты, будем называть *правилами приоритета*. Если для построения расписания использовать только прямую последовательную схему (разрешения ресурсных конфликтов), то все допустимые решения можно получить, изменяя приоритеты работ. Таким образом, эффективность конструктивных методов напрямую зависит от применяемого правила приоритета.

В этой работе будут рассмотрены самые популярные и перспективные правила приоритета, а также исследована их эффективность с использованием базы данных проектов *PSPLIB*. Кроме того, будет исследована их относительная эффективность при изменении количества работ в проекте и других фундаментальных параметров проекта.

2. Последовательная и параллельная схемы формирования расписания

Кроме направления разрешения ресурсных конфликтов, в конструктивных эвристических методах важную роль играет использование схемы формирования расписания, которая бывает последовательной или параллельной. Обе эти схемы были предложены в разных алгоритмах еще в 1963 г. одним из авторов метода критического пути [8]. Другим источником параллельных схем был метод *BAG* [16].

Суть последовательной схемы заключается в том, что после того, как определяется приоритет каждой работы, они последовательно ставятся в расписание в порядке приоритета, но с учетом отношений предшествования (т.е. прежде чем работа попадает в расписание, там должны оказаться все ее работы-предшественники). При этом начало каждой работы определяется как самое раннее начало (или самое позднее окончание при построении от последней работы к первой), которое возможно с учетом отношений предшествования и ресурсных ограничений.

Параллельная схема отличается от последовательной тем, что при формировании допустимого расписания более важной (приоритетной) задачей является по возможности максимальная загрузка ресурсов. Таким образом, работа, которая может выполняться сейчас (с точки зрения доступности ресурсов и отношений предшествования), будет поставлена в расписание раньше работы, которая из-за отношений предшествования сейчас выполняться не может, даже если последняя имеет больший приоритет.

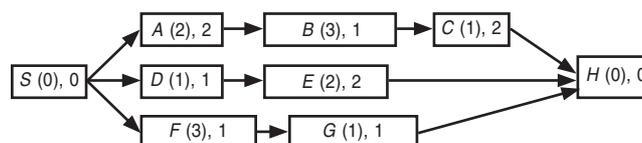


Рис. 1. Диаграмма «вершина–работа» проекта с ограниченными ресурсами

Проиллюстрируем применение последовательной схемы на примере проекта. На сетевой диаграмме (рис. 1) работы изображены прямоугольниками, латинские буквы — название работ, продолжительность указана в скобках, количество используемых ресурсов указано после запятой. Единицей ресурса можно считать человека. В проекте используется один тип ресурса, например, рабочий. Всего доступно 2 рабочих. Поскольку работа *A* требует для своего выполнения 2 ресурса, а работы *D* и *F* — по одному, одновременно все три работы (*A*, *D*, *F*) не могут быть выполнены, так как тогда бы потребовалось 4 человека. Будем также считать, что прерывать выполнение работ нельзя.

Допустим, правило приоритета задается лексикографическим порядком работ, т.е. *A* имеет максимальный приоритет, а *S* — минимальный. Сформируем список приоритетов, который бы учитывал отношения предшествования. В случае когда мы строим прямой список приоритета (для схемы с прямым направлением построения), мы должны начать с работы, которая может выполняться первой. Судя по сетевой модели проекта, это может быть только работа *S*, поэтому она первой попадает в этот список. За второе место борются работы *A*, *D*, *F*, и тут мы используем их приоритеты. Максимальный приоритет — у *A*, поэтому она попадает на второе место. Продолжая такие рассуждения, у нас получится следующий список: $\langle S, A, B, C, D, E, F, G, H \rangle$. Именно этот список мы будем использовать для применения прямой последовательной и параллельной схемы.

A	A	D			C	E	E							
A	A	B	B	B	C	E	E	F	F	F	G			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	

Рис. 2. Применение прямой последовательной схемы

Воспользуемся полученным списком работ $\langle S, A, B, C, D, E, F, G, H \rangle$ для применения последовательной схемы. Для этого нарисуем график загрузки ресурсов (рис. 2), по оси x которого отображаются дни выполнения проекта, а по оси y — количество ресурсов. Работы S и H не попадут на этот график, так как и продолжительность, и требуемое количество ресурсов равны нулю (это вехи). Первой после работы S будет работа A (согласно нашему списку). Она выполняется два дня и требует два ресурса. Далее берем работу B и пытаемся назначить ей самую раннюю возможную дату старта. С учетом всех ограничений это может быть только 3-й день. Далее берем работу C и т.д. В результате продолжительность проекта составила 12 дней.

A	A	D	F	F	F	C	E	E						
A	A	B	B	B		C	E	E	G					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	

Рис. 3. Применение прямой параллельной схемы

Теперь применим параллельную схему для того же списка приоритетов $\langle S, A, B, C, D, E, F, G, H \rangle$ (рис. 3). Отличие логики построения будет в том, что мы последовательно рассматриваем каждый день проекта, когда у нас есть свободные ресурсы, и пытаемся назначить этот день в качестве даты старта для максимального количества работ, которые могут выполняться в это время. В первый день проекта потенциально могут выполняться три работы: A, D, F . Наибольший приоритет — у работы A , поэтому она попадает первой в расписание. Далее ресурсы освобождаются только на 3-й день, в который могут выполняться работы B, D, F . Из них максимальный приоритет — у работы B , поэтому мы ее ставим в расписание. Но далее (здесь проявляется отличие от последовательной схемы) мы видим, что в 3-й день выполнения проекта осталась неиспользованной 1 ед. ресурса. В этот день могут выполняться работы D и F . Максимальный приоритет — у D , поэтому мы ее ставим в расписание. Если бы D требовала двух ресурсов вместо одного, нам бы пришлось на ее место поставить работу F . В любом случае в этот день наши ресурсы были бы полностью загружены. Продолжая рассуждения,

получим допустимое расписание продолжительностью 10 дней.

С использованием параллельной схемы мы получили более привлекательное расписание для того же проекта по сравнению с последовательной схемой, но так будет не всегда. Если говорить о большом числе проектов, то известен факт: параллельные схемы в среднем дают более качественные расписания, чем последовательные, какое бы правило приоритета мы ни использовали. С вычислительной точки зрения, на применение параллельной схемы требуется меньше компьютерного времени, чем на применение последовательной, хотя на первый взгляд кажется, что последовательная схема проще. Другими словами, параллельные схемы превосходят последовательные по эффективности. Но у них есть один недостаток: если применять всевозможные правила приоритета, то не все допустимые расписания будут получены (в отличие от последовательной схемы). Это означает, что какое бы правило приоритета мы ни использовали, возможна ситуация, при которой оптимальное решение мы не получим никогда [11]. Правда, на практике оптимальное решение не всегда нужно, часто можно ограничиться достаточно хорошим решением.

3. Правила приоритета

Как уже упоминалось выше, задача разрешения ресурсных конфликтов является одной из самых главных и часто встречающихся задач на практике. Поэтому сразу после изобретения метода критического пути стали разрабатываться различные эвристические методы. К концу 90-х гг. XX в. уже было более 70 различных методов, эффективность которых исследовалась во многих работах. Одной из наиболее полных таких работ является книга Р. Клейна [9]. Но, по иронии судьбы, одним из самых эффективных правил до сих пор остается «правило минимального резерва», которое предполагает, что приоритет выполнения имеет та работа, у которой меньше полный резерв, рассчитанный с помощью обычного *CPM* без учета ресурсных ограничений [8].

3.1. Классификации правил приоритета

Уже в 80-х гг. XX в. правил было так много, что Лоуренсом была предложена их классификация [14], основным признаком которой является тип информации, используемой для вычисления приоритета (табл. 1). Эта информация может быть четырех видов: продолжительность работ; отношения предшествования между всеми работами; расчеты *CPM*,

проводимые без ресурсных ограничений; информация о ресурсах, назначенных на работу и доступных в проекте. Последняя, пятая, категория использует сразу несколько источников информации для определения приоритетов работ.

Таблица 1

Классификация правил приоритета Лоуренса

Категория (источник информации)	Правила	Краткое описание (приоритет)
I. Свойства работ	<i>SPT</i> <i>LPT</i> <i>RND</i>	Минимальная длительность работ Максимальная длительность работ Случайный порядок
II. Сетевая модель	<i>MIS</i> <i>MTS</i> <i>LNRJ</i> <i>GRPW</i>	Наибольшее число прямых последователей Наибольшее число полных последователей Наименьшее число несвязанных работ Сумма длин работы и ее ее последователей
III. Метод критического пути	<i>EST</i> <i>EFT</i> <i>LST</i> <i>LFT</i> <i>SLK</i> <i>RSM</i>	Наименьшее раннее начало работы Наименьшее раннее окончание работы Наименьшее позднее начало работы Наименьшее позднее окончание работы Наименьший полный резерв работы Метод выравнивания ресурсов
IV. Ресурсы	<i>GRD</i> <i>GCUMRD</i> <i>RED</i> <i>CUMRED</i>	Наибольшее использование ресурсов Наибольшее накопленное использование ресурсов Ресурсный эквивалент продолжительности Накопленный <i>RED</i>
V. Гибридные правила	<i>WRUP</i> <i>IRSM</i> <i>WCS</i>	Средневзвешенное использование ресурсов Улучшенный <i>RSM</i> Резерв наихудшего случая

В 1989 г. испанскими исследователями была предложена модификация и расширение классификации Лоуренса [2]¹. В основе этой классификации лежат следующие признаки.

1. Используемая информация: сеть (*N*), ресурсы (*R*) или продолжительность (*T*).
2. Статичность правила: статические (*S*) и динамические (*D*).
3. Степень локальности информации: локальные (*L*) и глобальные (*G*).
4. Является ли рассчитанный приоритет нижней или верхней границей (*B*) или нет (*-*).

Первый пункт подвергся сокращению по сравнению с классификацией Лоуренса. Действительно, *СРМ* использует отношения предшествования (*N*) и продолжительности (*T*) для расчета ранних и поздних сроков, резервов и т.д., поэтому правила, использующие *СРМ*, можно классифицировать как

¹ Интересно отметить, что авторы этой классификации впоследствии предложили метод разработки расписаний занятий в школе и университете.

NT, без введения новой сущности. Поскольку приоритет на основе информации *СРМ* будет зависеть почти от всех работ, то такие правила будут глобальными. Правила, которые для расчета приоритета некоторой работы используют информацию только этой работы, являются локальными. Статические правила подразумевают, что приоритеты всех работ мы рассчитываем сразу и один раз, а затем строим расписание. Динамические правила подразумевают, что на каждом этапе применения последовательной или параллельной схемы приоритеты могут пересчитываться. И, наконец, признак нижней или верхней границы говорит, что правило в качестве приоритета рассчитывает число, определяющее минимальное или максимальное время выполнения проекта.

В соответствии с последней классификацией, правило *SLK* будет иметь следующие признаки: $\{N, T/D/G/B\}$, *MTS* — $\{N/S/G/-\}$, *SPT* — $\{T/S/L/-\}$.

3.2. Определение правил приоритета

Для определения правил приоритета будем использовать следующие обозначения:

- d_i — продолжительность *i*-работы проекта;
- S_i — множество прямых последователей *i*-работы;
- S_i^* — множество всех последователей *i*-работы (как прямых, так и транзитивных);
- $|S_i|$ — количество всех последователей *i*-работы;
- EST_i — раннее начало *i*-работы;
- EFT_i — раннее окончание *i*-работы;
- r_{ik} — количество *k*-й ресурса, назначенного на *i*-работу;
- a_k — общее доступное количество *k*-ресурса в проекте.

Информация об основных правилах приоритета приведена в табл. 2. Правила *RSM*, *WRUP*, *IRSM*, *WCS* будут рассмотрены далее.

Таблица 2

Описание и классификация правил приоритета

Правило	Классификация	Значение приоритета	Описание
<i>SPT</i>	1-я категория <i>T/S/L/-</i>	d_i	Минимальная продолжительность работы
<i>LPT</i>	1-я категория <i>T/S/L/-</i>	$-d_i$	Максимальная продолжительность работы
<i>MIS</i>	2-я категория <i>N/S/G/-</i>	$- S_i $	Максимальное число прямых последователей
<i>MTS</i>	2-я категория <i>N/S/G/-</i>	$- S_i^* $	Максимальное число всех последователей
<i>GRPW</i>	2-я категория <i>N,T/S/G/-</i>	$-d_i - \sum_{k \in S_i} d_k$	Максимум суммы продолжительности работы и ее ее прямых последователей
<i>EST</i>	3-я категория <i>N,T/S/G/B</i>	EST_i	Наименьшее раннее начало работы
<i>LFT</i>	3-я категория <i>N, T/S/G/B</i>	LST_i	Наименьшее позднее начало работы

Окончание табл. 2

Правило	Классификация	Значение приоритета	Описание
SLK	3-я категория N, T/S/G/B	$LST_i - EST_i$	Наименьший полный резерв
GRD	4-я категория R/S/L/-	$-r_{it} \cdot t_i$	Максимальный объем используемых ресурсов (только для одного ресурса)
RED	4-я категория R/S/L/-	$-\sum_k r_{ik} \cdot t_i \cdot w_k$	Максимальный объем используемых ресурсов (w_k — некоторые веса)
WRUP	5-я категория N, R/S/G/-	$-0.7 \cdot S_i - 0.3 \cdot \sum_k r_{ik} / a_k$	Максимум сумм кол-ва прямых последователей и среднего использования ресурсов

Некоторые из перечисленных выше правил могут быть как статическими, так и динамическими. Например, правила *EST*, *LST*, *SLK* и др. получают после применения *CPM*. Если один раз перед началом процесса формирования допустимого расписания рассчитать приоритеты, то получается статическое правило. Если при разрешении ресурсных конфликтов происходят задержки выполнения некоторых работ, то при этом меняются и ранние, и поздние сроки для последующих работ проекта, которые еще не поставлены в расписание, и может измениться критический путь. Если постоянно пересчитывать приоритеты, то соответствующие правила становятся динамическими. В этом случае мы будем в начале ставить букву *D* (*D SLK* и т.д.).

Некоторые правила не могут быть динамическими по определению, например, *SPT*. Как бы мы ни изменяли дату старта работы, ее продолжительность и продолжительность других работ не изменятся.

3.3. Замена для правила минимального резерва

Правило минимального резерва (*SLK*) естественным образом следовало из метода критического пути, однако с того самого времени исследователи не оставляли надежды найти правило, которое было бы эффективнее. В СССР предложили вместо правила полного резерва использовать правило минимального коэффициента напряженности работы [1]. Но одним из первых серьезных претендентов на это место можно считать метод *RSM* (*Resource Scheduling Method*), разработанный в 1965 г. [4]. Авторы не скрывали, что сделали его на замену правила минимального полного резерва и возлагали на него большие надежды, которые, к сожалению, не оправдались.

Изначальная идея была красивой. Допустим, мы уже определили даты начал некоторых работ нашего проекта. Нам нужно определить приоритеты для оставшихся работ. Рассмотрим *i*-работу. Если мы ее сейчас поставим в расписание, то она может задер-

жать выполнение всего проекта на некоторую величину *e*, которая будет не меньше

$$v(i) = \max \{0; EFT_i - LST_j + 1 | j - \text{оставшиеся работы}\}.$$

Отдельные элементы этого выражения, из которых выбирается максимум, представляют собой величину, на которую задержится поздний старт *j*-работы (и, соответственно, весь проект), если *i*-работа будет сейчас поставлена в расписание. В таком случае, нужно в расписание ставить сначала ту работу, у которой индуцированная задержка проекта *v(i)* будет минимальной.

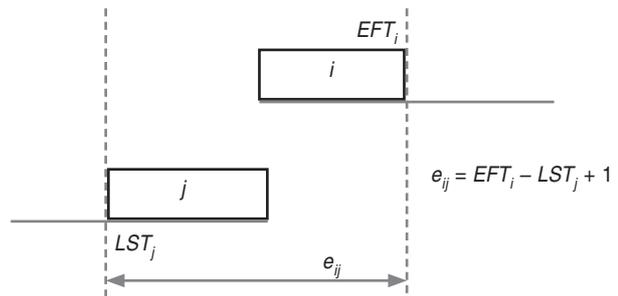


Рис. 4. Иллюстрация к методу *RSM*

Суть *v(i)* и основная проблема *RSM* проиллюстрированы на рис. 4. Горизонтальными линиями показаны резервы работ. Если мы сейчас ставим в расписание *i*-работу, то поздний старт *j*-работы будет задержан на величину *e_{ij}*, но так будет только в том случае, когда не хватает ресурсов, чтобы *j*-работу выполнять одновременно с *i*-работой. То, что *j*-работа не может начаться раньше *i*-работы, гарантирует алгоритм параллельной схемы, которая применяется в этом случае¹.

Именно этот недостаток *RSM* обнаружил и исправил Р. Колиш, в 1996 г. разработав на основе *RSM* сразу три новых метода: *IRSM*, *WCS*, *ACS* [10].

Суть нововведений в следующем. При расчете приоритета *i*-работы *v(i)* для каждой *j*-работы, которая, согласно параллельной схеме, претендует на этом этапе попасть в расписание, рассчитываем величину *ES_{ij}*, которая будет равна минимуму из дат, когда обе работы *i* и *j* смогут начаться одновременно (не нарушая ресурсных ограничений), и следующей даты после окончания *i*-работы, если она будет сейчас поставлена в расписание (т.е. как в оригинальном *RSM*). Далее приоритет рассчитывается аналогично *RSM*:

$$v(i) = \max_j \{0; ES_{ij} - LST_j\}.$$

¹ Из этого соображения также следует, что последовательную схему с методом *RSM* лучше не применять.

Правило с таким приоритетом и было названо *IRSM*. Кроме этого, было предложено правило *WCS* (*Worst Case Slack*), которое также основано на расчете ES_{ij} , но приоритет рассчитывается немного по-другому:

$$v(i) = LST_i - \max_j \{ES_{ji}\}.$$

Вычитаемое в этом выражении равно наиболее ранней дате, когда i -работа сможет начаться, если в настоящий момент в расписание попадет j -работа, которая максимально задержит i -работу. Другими словами, это самая поздняя из ранних начал i -работы в случае, если i -работа не будет сейчас поставлена в расписание. Нетрудно заметить, что если ресурсных ограничений нет, то *WCS* превращается в *SLK*, так как раннее начало выполнения i -работы не будет задерживаться из-за других работ.

Значение приоритета *WCS* можно интерпретировать как динамический резерв, на который можно задержать начало работы без прогнозируемых последствий для продолжительности проекта. На практике это значение зачастую оказывается отрицательным, что можно интерпретировать как худшую задержку проекта из возможных.

Также было предложено еще одно правило, использующее ES_{ij} . Это правило *ACS* (*Average Case Slack*):

$$v(i) = LST_i - AVG_j \{ES_{ji}\}.$$

Здесь *AVG* — функция, которая вычисляет среднее арифметическое. Однако эксперименты показали, что это правило работает значительно хуже даже *SLK*.

3.4. Исследования эффективности правил приоритета

Существует большое количество работ, посвященных оценке эффективности различных правил приоритета. Результаты одного из самых масштабных исследований описаны в работе Р. Клейна [9]. Сравнение меньшего количества правил приоритета на разных множествах проекта было описано в работах [3, 5–7, 11, 14–16].

В одном из первых масштабных исследований [5] сравнивались правила 1-й, 2-й и 3-й категорий. Получены следующие результаты: $SLK \ll LFT < RSM \ll RND \ll GRD < SPT$ ¹. Согласно исследованиям [3], получилось: $(SLK, LFT, RSM) \ll SPT \ll GRD$. Кроме того, авторы исследовали составные

методы из разных правил приоритета. В работе [11] получены результаты: $LFT > SLK > RSM > MTS > GRPW$.

Исследование, проведенное в этой работе, отличается большим количеством данных о результатах применения различных правил приоритета.

4. Методология исследования

Для исследования эффективности эвристических правил будем использовать ту же методологию, как и в первой части. Она подразумевает использование базы данных проектов *PSPLIB* [*PSPLIB*], принципы формирования которой отражены в работах Р. Колиша [11–13].

Мы будем использовать множества проектов *J30*, *J60*, *J90* [17], из которых удалены проекты, не имеющие ресурсных конфликтов. Каждое множество проектов было сгенерировано с помощью датчика случайных чисел. Проекты разбиты на группы, в которых проекты имеют одинаковые комбинации значений следующих параметров: *NC* (сложность сети), *RF* (среднее количество ресурсов, назначенных на одну работу), *RS* (коэффициент сложности ресурсных конфликтов). При значении $RS = 1$ ресурсных конфликтов нет, именно эту группу проектов мы исключили из нашего рассмотрения.

Каждый проект из множества *J30*, *J60*, *J90* состоит из 30, 60 и 90 работ соответственно и использует 4 типа разных ресурсов, которые ограничены. Параметры каждого проекта определяются 48 комбинациями значений *NC*, *RF*, *RS*, указанных в табл. 3.

Таблица 3

Значения параметров проектов из множеств: *J30*, *J60*, *J90*

Параметр	Значения
<i>NC</i>	1.5; 1.8; 2.1
<i>RF</i>	0.25; 0.5; 0.75; 1.0
<i>RS</i>	0.2; 0.5; 0.7; 1.0

5. Результаты исследования

Наша основная задача — сравнить эффективность всех рассмотренных выше правил приоритета. Для этого на каждом множестве проектов мы будем рассчитывать следующие величины: *Exact*. — доля проектов, в которой правило дало оптимальное решение; *Quality* — доля проектов, в которой данное правило показало самую короткую продолжительность по сравнению с другими; *New sol.* — доля проектов, в которой правило дало лучший результат, не повторенный ни одним другим правилом, участ-

¹ $A < B$ означает, что правило A лучше правила B (по матожиданию отклонения от оптимального решения). $A \ll B$ означает, что A существенно лучше B .

вующим в сравнении; *mean* — среднее отклонение от оптимального решения; *st. dev.* — среднеквадратическое отклонение от оптимального решения.

5.1. Правила приоритета первой категории

Начнем с правил приоритета первой категории по классификации Лоуренса: *SPT*, *LPT*, *RND* (табл. 4). Метод, который представлен в таблице под названием *Name*, означает, что мы в качестве правила приоритета используем номер работы, который был сформирован при генерации проекта. Полученные результаты говорят о том, что вне зависимости от схемы формирования расписания и количества работ в проекте, правила *SPT* и *LPT* работают не лучше, чем датчик случайных чисел (т.е. простое угадывание), иначе говоря, при выравнивании ресурсов продолжительность работы не имеет особого значения.

Таблица 4

Эффективность правил 1-й категории на множествах J30, J60

J30					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
Параллельная прямая схема					
Name	12,8%	46,4%	17,8%	9,3%	7,3%
RND	10,6%	25,0%	8,1%	12,9%	9,6%
SPT	8,9%	22,8%	6,7%	13,1%	9,5%
LPT	12,2%	28,6%	8,6%	13,6%	10,9%
Последовательная прямая схема					
Name	14,4%	29,2%	6,7%	12,6%	9,2%
RND	8,6%	11,9%	1,9%	19,4%	11,9%
SPT	4,7%	9,2%	2,8%	22,8%	13,2%
LPT	10,3%	17,5%	3,9%	16,4%	11,5%
J60					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
Параллельная прямая схема					
Name	10,0%	45,8%	27,2%	10,9%	7,9%
RND	7,5%	19,7%	4,7%	15,6%	11,3%
SPT	5,8%	17,5%	5,3%	14,6%	9,9%
LPT	9,4%	25,6%	9,7%	15,1%	11,3%
Последовательная прямая схема					
Name	13,9%	28,6%	10,3%	14,0%	10,6%
RND	3,9%	8,6%	2,2%	22,5%	14,4%
SPT	3,3%	3,9%	0,8%	26,0%	15,2%
LPT	7,5%	15,3%	5,0%	18,7%	12,8%

Другой важный результат вызывает вопросы относительно использованной методологии генерации проектов с помощью случайных чисел. Во всех случаях оказалось, что номера работ проектов выбраны не случайно и содержат в себе некоторую информацию, которая может помочь выравнивать ресурсы проекта. Это предмет для дальнейших исследований.

В последующем, если при применении различных правил приоритета окажется, что две работы имеют одно значение приоритета, то для определения приоритета будем использовать номер работы (чем меньше номер, тем выше приоритет).

5.2. Правила приоритета второй категории

Исследуем правила *MIS*, *MTS*, *LNRJ*, *GRPW* и *GRPW**. Все эти правила могут быть только статическими. *GRPW* отличается от *GRPW** тем, что в первом случае значение приоритета работы равно сумме ее продолжительности и продолжительностей ее прямых последователей, а во втором случае — всех последователей (и прямых, и транзитивных). Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

Эффективность правил 2-й категории

J30					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
MIS	15,8%	41,4%	6,7%	9,1%	7,5%
MTS	19,4%	55,8%	9,4%	6,7%	5,6%
LNRJ	16,7%	40,8%	5,6%	9,4%	8,0%
GRPW	16,4%	35,8%	5,3%	10,5%	8,6%
GRPW*	22,5%	65,3%	13,9%	6,2%	5,8%
J60					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
MIS	10,0%	29,2%	5,8%	11,1%	8,0%
MTS	17,2%	54,4%	11,7%	8,1%	6,7%
LNRJ	15,3%	39,2%	6,4%	11,1%	9,6%
GRPW	9,4%	24,2%	5,3%	12,9%	9,8%
GRPW*	18,9%	65,3%	20,8%	7,6%	6,3%

Приведенные результаты, с одной стороны, показывают, что независимо от количества работ в проекте наилучшим правилом является *GRPW** практически по любому приведенному параметру. С другой стороны, похожее по методу расчета приоритета правило *MTS*, хотя и немного хуже, дает порядка 10% новых решений (т.е. таких, которых не дает *GRPW**) среди всех тестируемых методов, что довольно много. Это говорит о том, что *MTS* и *GRPW** дают довольно разные расписания, поэтому целесообразно их использовать вместе.

Другим важным моментом является то, что «глобальные» (*G*) правила работают значительно лучше «локальных» (*L*).

5.3. Правила приоритета 3-й категории

К этой категории относятся правила, которые используют информацию, поставляемую методом критического пути. Это *EST*, *EFT*, *LST*, *LFT*, *SLK*, *RSM* в статических и динамических вариантах. Наи-

большой интерес представляют правила приоритета: 1) *LST*, *LFT* для прямой схемы; 2) *EST*, *EFT* для обратной схемы; 3) *SLK* и *RSM*.

LST и *LFT* при применении прямой параллельной схемы имеет смысл использовать только в статическом варианте, так как динамический, очевидно, будет давать точно такие же результаты. То же самое можно сказать и для правил *EST* и *EFT* для обратной параллельной схемы.

Правило *SLK*, напротив, стоит применять только в динамическом варианте с параллельной схемой. Дело в том, что динамический *SLK* дает значительно лучшие результаты, чем статический. При этом вычислительная сложность динамического *SLK* для параллельной схемы не выше статического *SLK*. Это становится ясно, если представить для каждой работы полный резерв в виде следующей формулы:

$$SLK_i = LST_i - EST_i = LST_i - \text{день принятия решения.}$$

Таким образом, применение параллельной схемы позволяет практически «бесплатно» (с вычислительной точки зрения) пересчитывать ранние сроки работ. Конечно, желательно также пересчитывать и поздние сроки, но это уже не дает столь ощутимого эффекта. Сводные результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

Эффективность правил приоритета 3-й категории

J30					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
<i>LST</i>	25,8%	68,3%	0,0%	6,0%	6,2%
<i>LFT</i>	23,9%	65,0%	3,3%	5,9%	5,4%
<i>D SLK</i>	25,8%	68,3%	0,0%	6,0%	6,2%
<i>D RSM</i>	20,3%	51,7%	6,7%	7,2%	6,3%
J60					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
<i>LST</i>	20,8%	63,1%	0,0%	7,0%	6,4%
<i>LFT</i>	18,9%	55,6%	5,8%	7,5%	6,5%
<i>D SLK</i>	20,8%	63,1%	0,0%	7,0%	6,4%
<i>D RSM</i>	17,5%	42,8%	12,2%	8,9%	7,3%

Главным результатом является примерная «одинаковость» всех этих правил. Каждое из них имеет свои достоинства и недостатки, которые по-разному проявляются в зависимости от проекта. Также видно (по количеству новых решений), что одновременно применять разные правила из этой категории довольно бессмысленно, так как вероятность получения качественно новых решений мала.

Из всего вышесказанного также следует, что динамическое правило *SLK* является одним из лучших

правил приоритета в этой категории (даже лучше *RSM*, который был изобретен на замену *SLK*).

5.4. Гибридные правила приоритета

Самыми интересными перспективными правилами, которые долго разрабатывали и улучшали, являются *WRUP* [15], *IRSM* и *WCS*. Сравним их эффективность с лучшими представителями правил других категорий (табл. 7).

Таблица 7

Эффективность гибридных правил приоритета

J30					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
<i>MTS</i>	19,4%	48,3%	5,8%	6,7%	5,6%
<i>GRPW*</i>	22,5%	54,7%	3,3%	6,2%	5,8%
<i>SLK</i>	25,8%	61,1%	2,5%	6,0%	6,2%
<i>IRSM</i>	25,8%	58,1%	5,0%	6,2%	6,1%
<i>WCS</i>	26,9%	67,8%	3,6%	5,2%	5,0%
<i>WRUP</i>	12,5%	30,0%	5,3%	10,1%	7,5%
<i>Multi</i>	31,9%	100,0%	0,0%	3,8%	3,8%
J60					
Rule	Exact.	Quality	New sol.	Mean	St.dev.
<i>MTS</i>	17,2%	39,7%	6,4%	8,1%	6,7%
<i>GRPW*</i>	18,9%	45,8%	6,4%	7,6%	6,3%
<i>SLK</i>	20,8%	56,4%	7,2%	7,0%	6,4%
<i>IRSM</i>	19,4%	42,8%	8,6%	8,2%	7,3%
<i>WCS</i>	21,9%	58,6%	7,2%	6,8%	6,1%
<i>WRUP</i>	10,0%	19,7%	3,1%	12,1%	8,6%
<i>Multi</i>	30,3%	100,0%	0,0%	5,3%	5,1%

Основным выводом, который можно сделать, является более высокая эффективность правила *WCS* практически по всем параметрам относительно других правил. Также интересно отметить, что правило *WRUP* работает хуже всех, даже хуже *MTS*. Отсюда следует, что попытка скрестить *MTS* с использованием ресурсов оказалась неудачной. С теоретической точки зрения это правило также можно считать наименее обоснованным.

Последняя строчка в табл. 7 соответствует методу, который выбирает лучшее решение из всех перечисленных выше для каждого проекта. Из результатов следует, что если применять этот 5-проходный метод, то для каждого третьего проекта удастся найти оптимальное решение и существенно сократить СКО. Это очень хороший результат, но полученный со значительными усилиями (многие методы предполагают сложные расчеты).

5.5. Зависимость эффективности правил приоритета от параметров сети

Основными параметрами проектов *PSPLIB*, для которых мы проводили расчеты, являются *NC*, *RF*,

RS. Некоторыми авторами высказывалась идея, согласно которой для каждого типа проекта существуют свои эффективные эвристические правила. Посмотрим, насколько качество полученных нами лучших правил зависит от изменения базовых параметров. Рассмотрим разные подмножества множества проектов *J30*, в которых один из базовых параметров принимает фиксированное значение (табл. 8).

Таблица 8

Сравнительная эффективность правил приоритета при разных базовых параметрах сети

<i>J30, RS = 0.2</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	6,7%	44,2%	7,5%	10,8%	7,1%
WCS	7,5%	59,2%	14,2%	8,9%	5,6%
MTS	7,5%	49,2%	15,8%	10,1%	5,8%
GRPWs	7,5%	45,8%	7,5%	10,3%	6,5%
<i>J30, RS = 0.5</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	28,5%	69,9%	4,1%	4,5%	4,1%
WCS	30,1%	79,7%	5,7%	4,0%	3,6%
MTS	19,5%	45,5%	3,3%	5,9%	4,8%
GRPWs	25,2%	63,4%	5,7%	5,0%	4,5%
<i>J30, NC = 1.5</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	40,6%	75,0%	2,5%	5,0%	6,1%
WCS	41,3%	78,8%	5,0%	4,4%	5,1%
MTS	39,4%	65,0%	6,9%	5,4%	6,0%
GRPWs	41,3%	71,9%	5,0%	5,2%	6,4%
<i>J30, NC = 1.8</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	44,4%	74,4%	3,8%	4,6%	6,1%
WCS	46,9%	81,3%	4,4%	3,8%	4,9%
MTS	41,3%	70,6%	6,3%	4,6%	5,4%
GRPWs	43,8%	71,9%	3,8%	4,6%	5,6%
<i>J30, RF = 0.25</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	61,7%	90,0%	0,0%	2,3%	3,8%
WCS	64,2%	96,7%	0,8%	1,8%	3,2%
MTS	59,2%	85,8%	0,0%	2,5%	4,1%
GRPWs	60,8%	86,7%	0,0%	2,3%	3,7%
<i>J30, RF = 0.5</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	40,0%	74,2%	2,5%	5,2%	6,3%
WCS	42,5%	82,5%	5,0%	4,5%	5,5%
MTS	35,8%	69,2%	4,2%	5,4%	6,0%
GRPWs	37,5%	75,0%	5,0%	5,1%	5,9%
<i>J30, RF = 0.75</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	35,0%	70,0%	4,2%	5,4%	6,9%
WCS	35,0%	75,0%	9,2%	4,5%	5,1%

Окончание табл. 8

MTS	29,2%	58,3%	10,0%	5,7%	5,7%
GRPWs	32,5%	61,7%	2,5%	5,7%	6,4%
<i>J30, RF = 1</i>					
<i>Rule</i>	<i>Exact.</i>	<i>Quality</i>	<i>New sol.</i>	<i>Mean</i>	<i>St.dev.</i>
SLK	40,8%	65,8%	5,8%	5,2%	5,9%
WCS	39,2%	72,5%	7,5%	4,6%	5,0%
MTS	34,2%	47,5%	8,3%	6,3%	6,0%
GRPWs	36,7%	61,7%	8,3%	5,5%	5,8%

Удивительно, но оказывается, что параметры *NC*, *RS* и *RF* не влияют на относительную эффективность правил приоритета. Хотя при этом они активно влияют на сложность проблемы СКО, среднее отклонение и т.д. Другими словами, правило приоритета *WCS* оказывается наилучшим, и это его свойство не зависит от количества работ в проекте, сложности сети и сложности ресурсных конфликтов.

Заключение

Основными результатами проведенного исследования являются:

- 1) странный эффект порядкового номера работ проектов *PSPLIB*, который в качестве правила приоритета работает лучше, чем простой датчик случайных чисел. Это говорит о том, что техника генерации проектов может рассматриваться как правило приоритета, что требует дальнейших исследований;
- 2) абсолютная неэффективность правил приоритета *SPT* и *LPT* — вместо них лучше использовать датчик случайных чисел;
- 3) несмотря на то что правило *LPT* достаточно плохое, его модификация *GRPW** — максимум из суммы продолжительности работы и всех ее последователей (включая транзитивных) — оказывается достаточно эффективным;
- 4) правила, которые связаны с топологией сети проекта, дают наибольший вклад в эффективность правила приоритета (к таким правилам можно причислить правила 2-й и 3-й категорий);
- 5) на сегодняшний день абсолютным лидером по эффективности является гибридное правило *WCS*, являющееся расширением правила *SLK*;
- 6) относительная эффективность правил приоритета не зависит от фундаментальных параметров сети *NC*, *RF*, *RS*, а также от количества работ в проекте.

На сегодняшний день мы не приблизились к разгадке того, по какой причине одни правила работают лучше других, какие свойства проекта позволяют получать оптимальное решение при использовании одного правила и достаточно плохое — при

использовании другого. Кроме того, несмотря на то, что метод критического пути не применим в случае ограниченных возобновляемых ресурсов, правила приоритета, основанные на информации, поставляемой этим методом (*LFT*, *SLK*, *WCS*), на сегодняшний день являются лучшими. Все эти вопросы требуют дальнейших исследований, которые могут привести к новым интересным показателям, наподобие полного резерва, которые будут иметь большое значение не только в разработке расписаний, но и других разделах управления проектами.

Литература

1. Царьков И.Н. Исследование эффективности методов оптимизации проекта с ограниченными ресурсами. Ч. 1 // Научные исследования и разработки: Российский журнал управления проектами. 2013. № 3.
Tsarkov I.N. Issledovanie effektivnosti metodov optimizatsii proekta s ogranichennymi resursami. Ch. 1 // Nauchnye issledovaniya i razrabotki: Rossiyskiy zhurnal upravleniya proektami. 2013. № 3.
2. Alvarez-Valdes R., Tamarit J.M. Heuristic algorithms for resource-constrained project scheduling: A review and an empirical analysis. In: R. Slowinski and J. Weglarz (Eds.). *Advances in Project Scheduling*. Elsevier. Amsterdam, 1989. P. 113–134.
3. Boctor F.F. Some Efficient Multi-Heuristic Procedures for Resource-Constrained Project Scheduling // *European Journal of Operational Research*. 1990. № 49. P. 3–13.
4. Brand J.D., Meyer W.L., Shaffer L.R. The Resource Scheduling Method in Construction [Report]. University of Illinois: Civil Engineering Studies Report. 1964. № 5. 1964.
5. Davis E.W. Project Scheduling under Resource Constraints-Historical Review and Categorization of Procedures // *IIE Transactions*. 1973. 5:4. P. 297–313.
6. Davis E.W., Patterson J.H. A Comparison of Heuristic and Optimum Solutions in Resource-Constrained Project Scheduling, // *Management Science*. 1975. № 21. P. 944–955.
7. Herroelen W.S. Resource-constrained Project Scheduling — State of the Art // *Operational Research Quarterly*. Vol. 23. 1972. № 3. Sept. P. 261–275.
8. Kelley J.E. The critical path method: resource planning and scheduling. Chapter 21 of *Industrial Scheduling* (J.F. Muth and G.L. Thompson, eds.). Prentice-Hall. Englewood Cliffs, 1963.
9. Klein R. *Scheduling of Resource-Constrained Projects*. Kluwer Academic Publisher, 2000.
10. Kolisch R. Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem // *Journal of Operations Management*. 1996b. № 14. P. 179–192.
11. Kolisch R. Serial and Parallel Resource-Constrained Project Scheduling Methods Revisited: Theory and computation // *European Journal of Operational Research*. 1996a. № 90. P. 320–333.
12. Kolisch R., Sprecher A., Drexel A. Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems // *Management Science*. 1995. № 41. P. 1693–1703.
13. Kolisch R., Sprecher A. PSPLIB — A Project Scheduling Library // *European Journal of Operational Research*. 1996c. Vol. 96. P. 205–216.
14. Lawrence S. Resource constrained project scheduling — A computational comparison of heuristic scheduling techniques, Technical report, Graduate School of industrial administration. Pittsburg: Carnegie-Mellon University, 1985.
15. Ulusoy G., Ozdamar L. Heuristic Performance and Network / Resource Characteristics in Resource-Constrained Project Scheduling // *Journal of the Operational Research Society*. 1989. № 40. P. 1145–1152.
16. Whitehouse G.E., Brown J.R. GENRES: An extension of Brooks Algorithm for project scheduling with resource constraints // *Computers&Industrial Engineering*. 1979. Vol. 3. Issue 3. P. 261–268.
17. PSPLIB. URL: <http://129.187.106.231/psplib/library.html/>

Приложение А

Отклонения от оптимального расписания на множестве J30

	Mean	St.dev.	Exact.	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 35%	+ 40%	+ 45%
Name	9,3%	7,3%	12,8%	20,0%	26,4%	18,3%	14,7%	4,2%	3,1%	0,3%	0,0%	0,3%
RND	12,9%	9,8%	9,7%	15,3%	18,9%	18,9%	14,7%	10,0%	5,8%	4,2%	1,1%	1,1%
SPT	13,1%	9,5%	8,9%	16,1%	16,9%	18,9%	16,7%	9,7%	7,5%	3,1%	1,4%	0,8%
LPT	13,6%	10,9%	12,2%	13,3%	17,5%	18,1%	13,6%	10,8%	5,6%	2,5%	4,2%	1,7%
MIS	9,1%	7,5%	15,8%	20,0%	22,5%	19,4%	13,9%	5,6%	1,9%	0,3%	0,3%	0,3%
MTS	6,7%	5,6%	19,4%	27,8%	23,9%	20,3%	7,5%	0,8%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%
LNRJ	9,4%	8,0%	16,7%	20,0%	21,7%	19,7%	10,3%	6,7%	3,6%	1,1%	0,3%	0,0%
GRPW	10,5%	8,6%	16,4%	14,4%	22,2%	20,3%	11,4%	7,8%	3,9%	3,3%	0,0%	0,3%
GRPW*	6,2%	5,8%	22,5%	27,5%	26,9%	15,3%	5,8%	0,8%	0,8%	0,3%	0,0%	0,0%
LST	6,0%	6,2%	25,8%	28,1%	22,8%	14,7%	5,0%	2,2%	1,1%	0,3%	0,0%	0,0%
LFT	5,9%	5,4%	23,9%	27,8%	25,3%	16,9%	3,9%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SLK	6,0%	6,2%	25,8%	28,1%	22,8%	14,7%	5,0%	2,2%	1,1%	0,3%	0,0%	0,0%
RED	12,3%	9,1%	10,8%	12,8%	21,4%	20,6%	14,7%	9,7%	5,3%	2,5%	1,9%	0,3%
RSM	7,2%	6,3%	20,3%	24,2%	23,6%	21,4%	5,3%	4,4%	0,6%	0,3%	0,0%	0,0%
IRSM	6,2%	6,1%	25,8%	24,7%	25,0%	14,2%	6,9%	2,2%	0,8%	0,3%	0,0%	0,0%
WCS	5,2%	5,0%	26,9%	30,0%	24,7%	13,9%	3,3%	0,8%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%
WRUP	10,1%	7,5%	12,5%	18,6%	23,3%	17,8%	19,4%	5,6%	2,2%	0,0%	0,3%	0,3%

Приложение В

Отклонение от оптимального расписания на множестве J60

Rule	Mean	St.dev.	Exact.	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 35%	+ 40%	+ 45%
Name	10,9%	7,9%	10,0%	17,5%	21,7%	18,9%	18,3%	8,1%	5,0%	0,6%	0,0%	0,0%
RND	15,4%	11,2%	5,8%	15,3%	18,6%	13,6%	11,9%	14,2%	8,9%	6,4%	3,6%	0,3%
SPT	14,6%	9,9%	5,8%	13,3%	18,1%	16,7%	14,4%	14,7%	9,2%	5,3%	1,9%	0,6%
LPT	15,1%	11,3%	9,4%	12,5%	17,8%	14,7%	13,6%	11,9%	8,1%	4,7%	5,0%	2,2%
MIS	11,1%	8,0%	10,0%	16,9%	21,7%	19,4%	16,7%	9,4%	4,7%	0,8%	0,3%	0,0%
MTS	8,1%	6,7%	17,2%	21,9%	21,7%	21,9%	12,5%	4,2%	0,3%	0,0%	0,3%	0,0%
LNRJ	11,1%	9,6%	15,3%	18,3%	20,3%	13,6%	13,3%	8,3%	6,4%	3,3%	0,8%	0,3%
GRPW	12,9%	9,8%	9,4%	16,7%	16,9%	17,8%	13,9%	12,8%	7,8%	2,8%	1,1%	0,6%
GRPW*	7,6%	6,3%	18,9%	22,5%	22,5%	21,1%	11,9%	2,2%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%
LST	7,0%	6,4%	20,8%	25,0%	24,4%	15,8%	10,3%	2,8%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%
LFT	7,5%	6,5%	18,9%	24,7%	20,8%	21,7%	10,3%	2,5%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%
SLK	7,0%	6,4%	20,8%	25,0%	24,4%	15,8%	10,3%	2,8%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%
RED	14,9%	11,1%	8,9%	11,9%	18,3%	17,5%	12,8%	10,0%	10,0%	4,7%	3,3%	1,7%
RSM	8,9%	7,3%	17,5%	19,2%	20,3%	22,2%	12,5%	6,1%	1,7%	0,6%	0,0%	0,0%
IRSM	8,2%	7,3%	19,4%	23,6%	19,7%	15,3%	13,9%	6,4%	1,4%	0,3%	0,0%	0,0%
WCS	6,8%	6,1%	21,9%	23,9%	24,2%	19,4%	7,8%	1,9%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%
WRUP	12,1%	8,6%	10,0%	15,6%	17,8%	19,4%	18,6%	11,4%	4,7%	1,4%	0,8%	0,3%

Приложение С

Отклонение от оптимального расписания на множестве J90

Rule	Mean	St.dev.	Exact.	+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%	+ 25%	+ 30%	+ 35%	+ 40%	+ 45%
Name	10,9%	8,7%	9,4%	23,6%	18,1%	18,1%	13,9%	9,7%	4,7%	1,7%	0,6%	0,3%
RND	15,5%	11,1%	5,6%	16,9%	14,2%	15,8%	12,8%	13,6%	10,6%	6,1%	2,5%	0,8%
SPT	15,5%	10,6%	5,0%	12,5%	20,6%	15,3%	11,7%	13,9%	11,1%	5,8%	2,5%	1,4%
LPT	15,7%	12,0%	5,3%	17,2%	18,3%	13,9%	11,1%	10,0%	9,7%	6,9%	4,2%	2,2%
MIS	10,9%	8,4%	8,9%	23,3%	20,0%	15,6%	14,7%	11,9%	4,4%	0,6%	0,3%	0,3%
MTS	7,7%	7,0%	15,8%	31,4%	16,9%	20,8%	9,4%	4,4%	0,6%	0,3%	0,3%	0,0%
LNRJ	11,1%	10,1%	15,6%	23,9%	14,7%	10,3%	11,9%	11,7%	8,6%	1,9%	0,8%	0,3%
GRPW	13,4%	10,9%	9,2%	20,3%	17,8%	13,3%	9,4%	12,8%	7,5%	6,9%	1,9%	0,6%
GRPW*	7,2%	6,7%	18,6%	31,7%	15,8%	18,1%	10,6%	3,9%	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%
LST	6,6%	6,4%	21,9%	30,6%	15,6%	20,0%	9,7%	1,7%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%
LFT	6,7%	6,4%	20,6%	30,6%	17,8%	18,1%	10,0%	2,8%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%
SLK	6,6%	6,4%	21,9%	30,6%	15,6%	20,0%	9,7%	1,7%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%
RED	15,0%	11,1%	5,8%	15,6%	17,5%	16,4%	13,3%	10,3%	10,3%	5,6%	3,6%	0,6%
RSM	8,6%	7,7%	15,6%	28,9%	16,9%	13,9%	15,3%	7,5%	1,1%	0,8%	0,0%	0,0%
IRSM	7,8%	7,7%	21,4%	26,9%	15,8%	16,4%	10,8%	5,6%	2,8%	0,0%	0,0%	0,3%
WCS	6,3%	6,0%	22,2%	31,7%	15,8%	21,4%	7,2%	1,4%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%
WRUP	12,3%	9,2%	6,9%	19,2%	23,3%	10,8%	18,1%	11,7%	6,4%	2,5%	0,8%	0,0%