

**Литература**

1. URL: <http://ru.kaizen.com/index.php?id=551>
2. URL: <http://www.vestnikmckinsey.ru/manager-toolkit/top-total-naya-optimizaciya-proizvodstva>
3. Авраамова Е.М., Верпаховская Ю.Б. Работодатели и выпускники вузов на рынке труда: взаимные ожидания // Социологические исследования. 2006. № 4. С. 37–46.
4. Добрынина Е. Научи ученого // Российская газета. Федеральный выпуск № 4521 от 17 ноября 2007 г.
5. Имаи М. Гемба кайдзен. Путь к снижению затрат и повышению качества. М.: Альпина Паблишер, 2014.
6. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства. М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2005.

**The formation of the Vyatka state university of the competence Centre of lean manufacturing**

*Valentin Nikolaevich Pugach, Cand. Econ. of Sciences, rector, Vyatka state University*

*Sergey Valeryevich Fomin, Cand. of technical Sciences, Vice-rector on educational-methodical work, Vyatka state University*

*Michael Georgievich Dorrer, Cand. tech. Sciences, adviser to the rector's office, Vyatka state University*

*This paper proposes a systematic approach to improving the effectiveness of the university (for example, Vyatka State University) on the principles of the Lean Production. System improvements should be expressed not only in enhancing the value of the educational services provided to the economy in general and for the trainees, but and in the improving the effectiveness of the working processes of the university. Solution of the problem is achieved by transforming the working process of University on the principles of continuous improvement (Kaizen) with simultaneous implementation of lean manufacturing training in the educational process of the University.*

*University management, lean manufacturing, increasing efficiency*

УДК 007:004.02

**ФОРМИРОВАНИЕ КАЛЕНДАРНЫХ ГРАФИКОВ  
МУЛЬТИПРОЕКТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ**

*Николай Николаевич Клеванский, канд. техн. наук, профессор СГАУ,*

*E-mail: [nklevansky@yandex.ru](mailto:nklevansky@yandex.ru),*

*Андрей Алексеевич Красников, аспирант,*

*E-mail: [nklevansky@yandex.ru](mailto:nklevansky@yandex.ru),*

*Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова.*

*<http://sgau.ru>*

*В статье представлены основные концепции и подходы в реализации задач формирования календарных планов мультипроектного планирования для набора заданий библиотеки PSPlib. Предложены основные критерии в задачах выбора при формировании и оптимизации календарных планов.*

*Ключевые слова: расписание, заявка, событие, календарный план, жадный алгоритм, методы ранжирования.*

**Введение**

Мультипроектное планирование включает две взаимосвязанные задачи – формирование календарного графика [1, 2] и распределение ресурсов [3, 4]. Календарные графики мультипроектного планирования (рисунок 1) относятся к расписаниям иерархических или сетевых структур действий [5–7]. Проекты могут быть технологически независимыми, но объединенными по потребляемым ресурсам, прежде всего по возобновляемым.



**Н.Н. Клеванский**

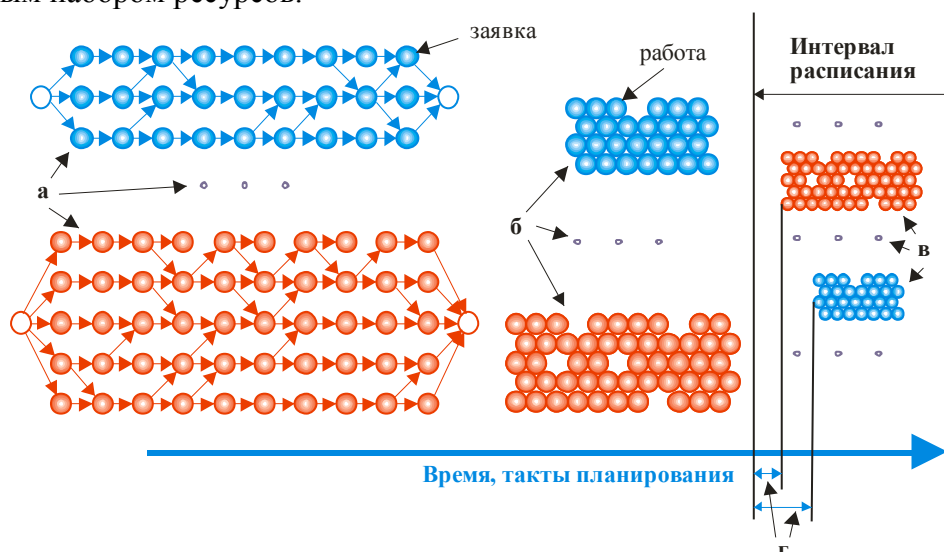
Для полного описания комплекса работ каждого проекта необходимо наличие описание каждой работы. Трудоемкость (продолжительность) работ измеряется в тактах планирования. Потребности отдельных работ в ресурсах измеряются условными единицами на такт планирования. Все работы проектов будут выполняться с постоянной интенсивностью [1], то есть количество единиц требуемых ресурсов на каждом такте планирования в процессе выполнения работы не меняется. Каждый тип ресурса однороден.

Отношение предшествования в сетевых моделях не является строгим – последующая деятельность не может начинаться раньше окончания предшествующей деятельности. Представляя заявки вершинами, а отношения следования – ребрами, получаем ациклические ориентированные графы, в которых хотя бы одна вершина является начальной (источник), а следующие за ней вершины с ребрами образуют сеть с хотя бы одной конечной вершиной (сток) (рисунок 1, 3).



**А.А. Красников**

Задачи расписания являются задачами формирования и оптимизации процесса обслуживания конечного множества требований (заявок) на осуществление действий (работ, событий, операций) в системе с ограниченными ресурсами. Для каждого требования в качестве исходных данных указываются допустимые наборы ресурсов и, при необходимости, требуемые объемы каждого ресурса. Расписание обслуживания требований – это однозначное отображение, в котором каждому требованию в определенный промежуток времени ставится действие с задаваемым или определяемым набором ресурсов.



**Рисунок 1 – Схема формирования расписания (календарного графика) для сетей заявок/работ: а – графы сетей проектов, проекты; б – агрегации проектов; в – календарные графики проектов в календарном графике мультипроектного планирования; г – времена начала выполнения проектов**

Отличие заявок от работ определяется только одним атрибутом – временем начала выполнения работы. То же самое относится к различиям между заявкой проекта и проектом. Включение времени начала выполнения проекта превращает заявку проекта в проект.

Формирование расписания – это определение времен начала выполнения всех действий или их совокупностей в интервале расписания [8]. Для мультипроектного планирования необходимо последовательное решение двух задач:

– определение относительных начальных времен выполнения каждой работы в пределах интервала расписания (длительности календарного графика) проекта (в большинстве случаев, длительности критического пути графа проекта, или задаваемой/переопределяемой длительности);

– определение относительных начальных времен выполнения агрегаций заявок проектов в пределах задаваемого или определяемого интервала расписания (длительности календарного графика мультипроектного планирования).

Первая задача – агрегирования, в статье рассматриваться не будет, так как имеет самостоятельное значение и, в большей степени с некоторыми отличиями, является задачей управления одним проектом. Будет полагаться, что агрегации всех проектов мультипроекта известны. В пределах каждой агрегации заявки становятся работами с не определенными временами начала в календарном графике мультипроекта. В дальнейшем, термин «проект» будет применяться вместо термина «агрегация заявки проекта».

Статья посвящена решению второй задачи, а ее целями являются:

–представление подходов к программному формированию расписания (календарного графика) для произвольного количества сетей заявок (агрегаций заявок проектов) в системе с однородными ресурсами;

–разработка инструмента (информационной системы) для решения практических задач мультипроектного планирования.

## 1 Общие подходы

В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для формирования календарных графиков мультипроектного планирования использовались следующие концепции [5]:

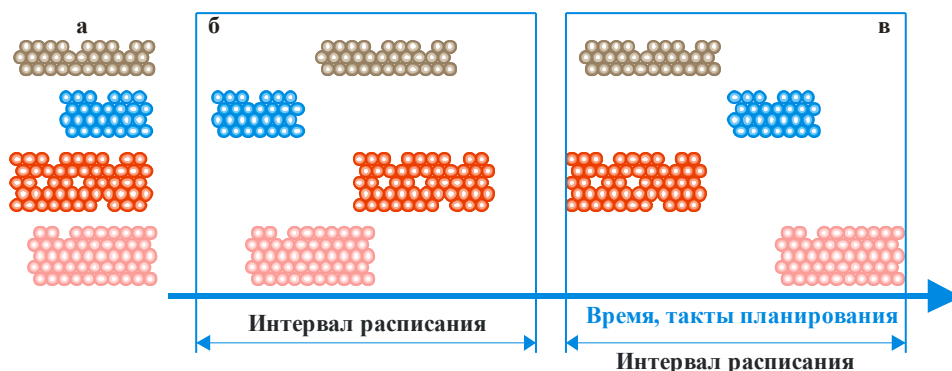
- программное решение задачи в рамках СУБД;
- двухэтапный процесс решения;
- идеология жадного алгоритма;
- концепция загрузки;
- концепция равномерности [9];
- использование методов ранжирования теории принятия решений [10, 11].

Двухэтапный процесс решения задачи формирования календарного графика [4, 6, 7, 11] включает формирование начального календарного графика и последующую его оптимизацию (рисунок 2). Под начальным календарным графиком будет пониматься программно сформированный календарный график выполнения проектов при соблюдении обязательных ограничений и максимальном учете желательных ограничений. Методы обоих этапов цикличны и завершаются либо после включения всех проектов в начальный календарный график, либо при невозможности дальнейшего улучшения календарного графика.

Задача формирования начального календарного графика решается последовательным выбором очередного проекта и последующим его включением в календарный график в определяемое время начала выполнения проекта (рисунок 1). Выбор проекта базируется на концепции загрузки, то есть на каждом шаге определяется наиболее загруженный по требуемым ресурсам проект. Выбор времени включения этого проекта базируется на концепции равномерности использования ресурсов системы. То есть, на

каждом шаге решения задачи формирования начального календарного графика присутствуют две операции выбора, после каждой из которых принимаются некоторые решения.

Для реализации концепции равномерности в мультипроектном планировании принята следующая посылка: для заданного объема ресурса  $V$  мерой равномерности его потребления на интервале  $t$  будет максимальное значение удельного потребления ресурса  $V_{\max} \rightarrow \frac{V}{t}$ .



**Рисунок 2 – Этапы формирования календарного графика:  
а – агрегации проектов; б – начальный календарный график;  
в – оптимизированный календарный график**

Задача оптимизации начального календарного графика решается последовательным выбором наиболее неравномерного проекта и последующей его перестановкой в расписании в выбираемое время начала выполнения проекта. Перестановка проекта в календарном графике мультипроекта также базируется на концепции равномерности. То есть, выбираемое время перестановки, по крайней мере, не ухудшает показатели равномерности всего мультипроекта. На каждом шаге решения задачи оптимизации календарного графика также присутствуют две операции выбора и необходимость принятия некоторых решений.

Такой подход на обоих этапах характерен для жадных алгоритмов и применим для задач формирования расписаний и связанных с этим задач распределения ресурсов [4, 12, 13].

Жадный подход строит решение посредством последовательности шагов, на каждом из которых получается частичное решение поставленной задачи, пока не будет получено полное решение. Использование идеологии жадных алгоритмов предполагает цикличность алгоритмов для обоих этапов решения задачи формирования расписания [12, 13]. Использование подходов GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) [14] не представляется возможным в связи использованием ранжированного представления исходных данных в соответствии с последней из используемых концепций.

Операции выбора в представляемых алгоритмах являются многокритериальными [15, 16] и для их реализации привлечен аппарат методов ранжирования. В [11] применен метод анализа иерархий [17]. Операции выбора в представляемом методе формирования календарных графиков мультипроектного планирования использованы методы Сафронова В.В. [18, 19, 20, 21]. В основе этих методов лежит метод многокритериального ранжирования, одна из разновидностей которого – метод «жесткого» ранжирования был принят для формализации алгоритмов и реализации программного обеспечения. В дальнейшем под термином многокритериальное ранжирование будет пониматься «жесткое» ранжирование. Будет различаться прямое и обратное многокритериальное ранжирование. В прямом ранжировании исходные данные ранжируются по «возрастанию», в обратном – по «убыванию».

## 2 Постановка и формализация задачи

Введем необходимые в дальнейшем обозначения.

**Исходные данные задачи:**

$I$  – количество проектов мультипроектного планирования;

$P = \{p_i, i = \overline{1, I}\}$  – множество проектов мультипроекта;

индекс проекта  $i = \overline{1, I}$  имеет различный характер в зависимости от решаемой задачи:

–идентификатор проекта в соответствующей таблице БД;

–порядковый номер проекта при его включении в начальный календарный график;

–порядковый номер проекта при оптимизации начального календарного графика;

$ne_i$  – количество работ проекта  $p_i$ ;

$E_i = \{e_{j,i}, j = \overline{1, ne_i}, i = \overline{1, I}\}$  – множество работ проекта  $p_i$  ( $j=1$  – источник,  $j = ne_i$  – сток);

индекс работы  $j = \overline{1, ne_i}$  также имеет различный характер в зависимости от решаемой задачи:

–идентификатор работы в соответствующей таблице БД;

–идентификатор работы в множестве работ проекта;

–идентификатор работы во множестве работ пути графа проекта;

$u$  – количество типов возобновляемых ресурсов;

$K = \{k_m, m = \overline{1, u}\}$  – множество типов возобновляемых ресурсов;

$R_{m,i}, m = \overline{1, u}, i = \overline{1, I}$  – объем ресурса типа  $k_m$ , выделяемый проекту  $p_i$  во время его выполнения на каждом такте планирования;

$r_{m,j,i}, m = \overline{1, u}, j = \overline{1, ne_i}, i = \overline{1, I}$  – объем ресурса типа  $k_m$ , требуемый работе  $e_{j,i}$  проекта  $p_i$  во время ее выполнения на каждом такте планирования;

$d_{j,i}, j = \overline{1, ne_i}, i = \overline{1, I}$  – длительность (трудоемкость) выполнения работы  $e_{j,i}$  проекта  $p_i$ ;

$Int$  – интервал расписания – заданная длительность календарного графика в тактах планирования.

**Исходные расчетные данные задачи:**

$np_i, i = \overline{1, I}$  – количество путей графа сети проекта  $p_i$ ;

$PT_i = \{pt_{j,i}, j = \overline{1, np_i}, i = \overline{1, I}\}$  – множество путей графа сети проекта  $p_i$ ;

$Cp_i, i = \overline{1, I}$  – критический путь проекта  $p_i$ , такты планирования;

$nep_{j,i}, j = \overline{1, ne_i}, i = \overline{1, I}$  – количество работ пути  $p_{i,j}$  графа сети проекта  $p_i$ ;

$PE_{p,i} = \{e_{p,i}, p = \overline{1, nep_{j,i}}, i = \overline{1, I}\}, PE_{i,p} \in E_i$  – множество работ пути  $pt_{j,i}$  графа сети проекта  $p_i$ ;

$D_i$  – длительность (трудоемкость) выполнения проекта  $p_i$  в тактах планирования. В предлагаемом решении принято  $D_i = Cp_i, i = \overline{1, I}$ ;

**Переменные задачи:**

$ni, ni = \overline{1, I}$  – количество:

–включенных в начальный календарный график проектов;

–оптимизированных (переставленных) проектов в календарном графике;



$nr$ ,  $nr = \overline{1, I}$  – количество:

– не включенных в начальный календарный график проектов;

– не оптимизированных проектов в календарном графике;

на любом шаге формирования начального календарного графика  $ni + nr \equiv I$ ;

$R\max_m$ ,  $m = \overline{1, u}$  – максимальный тактовый объем потребляемого ресурса типа  $k_m$  в календарном графике;

$TI_i$  – начальный такт планирования для выполнения проекта  $p_i$  в календарном графике;

$TF_i = TI_i + D_i$  – финальный такт планирования для выполнения проекта  $p_i$  в календарном графике;

$rp_{m,j,i}$ ,  $m = \overline{1, u}$ ,  $j = \overline{TI_i, TF_i}$ ,  $i = \overline{1, I}$  – объем ресурса типа  $k_m$ , потребляемый проектом  $p_i$  на  $j$ -ом такте интервала расписания;

$RS_{m,j}$ ,  $m = \overline{1, u}$ ,  $j = \overline{0, Int-1}$  – объем ресурса типа  $k_m$ , потребляемый календарным графиком на  $j$ -ом такте интервала расписания;

$$RM_m = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{ne_i} r_{m,j,i} \times d_{j,i}}{Int}, \quad m = \overline{1, u}, \quad j = \overline{TI_i, TF_i}, \quad i = \overline{1, I} \text{ – средний объем ресурса}$$

типа  $k_m$ , потребляемый работами проектов календарного графика на каждом такте интервала расписания;

$RP_{m,j,i}$ ,  $m = \overline{1, u}$ ,  $j = \overline{TI_i, TF_i}$ ,  $i = \overline{1, nr}$  – оценка равномерности  $j$ -го такта проекта  $p_i$  по ресурсу типа  $k_m$ ;

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{Int} \sum_{j=0}^{Int-1} (RM_m - RS_{m,j})^2}, \quad m = \overline{1, u} \text{ – среднее квадратичное отклонение потребления}$$

ресурса типа  $k_m$  на всех тактах интервала расписания от среднего значения потребления этого ресурса в расписании.

**2.1 Задача формирования начального календарного графика** состоит в пошаговом выборе очередного проекта и формировании расписания  $S = \{TI_i, i = \overline{1, ni}\}$ , которое минимизирует вектор максимальных тактовых объемов потребляемых ресурсов внутри задаваемого интервала расписания

$$\min(R\max_1, R\max_2, \dots, R\max_u), \tag{1}$$

при обязательных ограничениях

$$\forall i TI_i \geq 0, \quad i = \overline{1, ni}; \quad \forall i TF_i \leq Int, \quad i = \overline{1, ni}. \tag{2}$$

Целевая функция (1) обеспечивает минимизацию верхнего ограничения отклонений, что достаточно для формирования начального календарного графика при включении очередного проекта в график. Целевая функция связана с необходимостью многокритериального ранжирования получаемых векторов (1). Завершение процесса формирования начального календарного графика обусловлено исчерпанием списка не включенных в график проектов ( $nr=0$ ). Неравенства ограничений (2) отражают безусловность нахождения проектов внутри интервала расписания.

Введем следующие выражения для этапа формирования начального календарного графика.

Оценка загрузки работы  $e_{j,i}$  не включенного в календарный проекта  $p_i$  на очередном шаге формирования начального календарного графика определяется объемом требуемого в период выполнения работы ресурса

$$c_{j,m,i} = r_{j,m,i} * d_{j,i}, \quad j = \overline{1, ne_i}, \quad m = \overline{1, u} \quad i = \overline{1, nr}. \quad (3)$$

Значения оценок загрузки  $c_{j,m,i}$  находятся в интервале  $[0, 100]$ . Чем больше величина оценки (3), тем более соответствующая работа  $e_{j,i}$  проекта  $p_i$  загружена по ресурсу типа  $k_m$ . Оценки загрузки работ (3) формируют множество векторов (критериев загрузки) работ на очередном шаге формирования начального календарного графика

$$\left\{ \left( c_{j,m,i}, \quad j = \overline{1, ne_i}, \quad m = \overline{1, u}, \quad i = \overline{1, nr} \right) \right\}. \quad (4)$$

Обратное многокритериальное ранжирование векторов (4) порождает множество рангов работ

$$\left\{ rank1_{j,i}, \quad j = \overline{1, ne_i}, \quad i = \overline{1, nr} \right\}. \quad (5)$$

Ранги работ (5) формируют множество векторов (критериев загрузки) путей графов сетей проектов

$$\left\{ \left( rank1_{i,1}, rank1_{i,2}, \dots, rank1_{i, ne_i} \right), \quad j = \overline{1, ne_i}, \quad i = \overline{1, nr} \right\}. \quad (6)$$

Обратное многокритериальное ранжирование всех векторов (6) порождает множество рангов векторов (критериев загрузки) путей графов сетей проектов

$$\left\{ rank2_{j,i}, \quad j = \overline{1, np_i}, \quad i = \overline{1, nr} \right\}. \quad (7)$$

Ранги векторов (7) формируют множество векторов (критериев загрузки) проектов

$$\left\{ RP_i = \left( rank2_{i,1}, rank2_{i,2}, \dots, rank2_{i, np_i} \right), \quad i = \overline{1, nr} \right\}. \quad (8)$$

Старший по рангу проект, полученный прямым многокритериальным ранжированием векторов (8), является самым загруженным при принятых оценках и критериях загрузки. Он становится очередным кандидатом  $p_{ni+1}$  на включение в начальный календарный график.

Для определения начального времени включения  $TI_{ni+1}$  проект  $p_{ni+1}$  последовательно, по одному такту перемещается с учетом ограничений (2) внутри интервала расписания  $Int$ , формируя множество векторов:

$$\left\{ \left( R \max_{1,j}, R \max_{2,j}, \dots, R \max_{u,j} \right), \quad j = \overline{0, (Int - Cp_{ni+1} - 1)} \right\}. \quad (9)$$

Прямое многокритериальное ранжирование векторов (9) определяет доминирующий вектор, индекс  $j$  которого определяет искомое начальное время включения проекта  $p_{ni+1}$  в начальный календарный график  $TI_{ni+1} = j$ .

**2.2 Задача оптимизации начального календарного графика** состоит в изменении начального расписания для формирования расписания  $S = \{ TI_i, i = \overline{1, ni} \}$ , которое минимизирует вектор среднеквадратичных отклонений потребления ресурсов  $(\sigma_m, m = \overline{1, u})$  на всех тактах интервала расписания от средних значений потребления ресурсов расписания

$$\min(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_u), \quad (10)$$

при обязательных ограничениях (2).

Целевая функция (10), являясь интегральной оценкой календарного графика, минимизирует все отклонения. Целевая функция связана с необходимостью многокритериального ранжирования получаемых на ее основе векторов (10). Завершение процесса оптимизации начального календарного графика обусловлено принимаемой стратегией действий.

Оценка равномерности  $j$ -го такта проекта  $p_i$  по ресурсу  $k_m$  на очередном шаге оптимизации начального календарного графика определяется следующим выражением

$$RP_{m,j,i} = \frac{rp_{m,j,i} * RS_{m,j}}{RM_m * RM_m}, \quad m = \overline{1, u}, \quad j = \overline{TI_i, TF_i}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (11)$$

Значения тактовых оценок равномерности находятся в интервале  $[0, 1]$ . Чем больше величина оценки (11), тем неравномернее соответствующий проект на данном такте интервала расписания по данному ресурсу. Оценки равномерности проектов (11) формируют  $u$  множеств векторов (критериев равномерности) проектов по каждому ресурсу.

$$PR_m = \left\{ \left( RP_{m,j,i}, \quad j = \overline{1, ne_i} \right), \quad i = \overline{1, I} \right\}, \quad m = \overline{1, u}. \quad (12)$$

Прямое многокритериальное ранжирование векторов (12) проектов расписания порождает множества рангов векторов проектов по каждому ресурсу

$$Rank3_m = \left\{ rank3_{m,i}, \quad i = \overline{1, I} \right\}, \quad m = \overline{1, u}. \quad (13)$$

Ранги векторов (13) формируют множество векторов (критериев равномерности) неоптимизированных проектов

$$\left\{ RP_i = \left( rank3_{i,1}, rank3_{i,2}, \dots, rank3_{i,u} \right), \quad i = \overline{1, nr} \right\}. \quad (14)$$

Старший по рангу проект, полученный прямым многокритериальным ранжированием векторов (14), является самым неравномерным среди неоптимизированных при принятых оценках и критериях равномерности. Он становится очередным кандидатом  $p_{ni+1}$  на перестановку в календарном графике.

Для определения начального времени  $TI_{ni+1}$  перестановки проект  $p_{ni+1}$  последовательно, по одному такту перемещается с учетом ограничений (2) внутри интервала расписания  $Int$ , формируя множество векторов:

$$\left\{ \left( \sigma_{1,j}, \sigma_{2,j}, \dots, \sigma_{u,j} \right), \quad j = \overline{0, Int-1} \right\}. \quad (15)$$

Прямое многокритериальное ранжирование векторов (15) определяет доминирующий вектор, индекс  $j$  которого определяет искомое начальное время для перестановки проекта  $p_{ni+1}$  в календарном графике  $TI_{ni+1} = j$ .

Окончание процесса оптимизации начального календарного графика, как отмечено выше, определяется принятой стратегий:

– однопроходная стратегия – последовательный выбор неоптимизированного проекта с переводом его в оптимизированные после определения начального времени перестановки;

– многопроходная стратегия – несколько последовательно применяемых однопроходных стратегий.



### 3 Реализация и численные результаты

Для численных экспериментов использовалось тестовое задание, включающее  $I=15$  проектов, случайно выбранных из библиотеки тестовых задач PSPLib [22]. Проекты включают по  $n_{e_i}, i = \overline{1,15} = 30$  работ для выполнения. Для своего выполнения проектам требуется 4 типа ресурсов ( $u=4$ ). В таблице 1 представлены характеристики проектов тестового задания.

Таблица 1

Характеристики проектов тестового задания

№ проекта	Обозначение проекта	Код генератора	Выделяемые проекту ресурсы на такт планирования				Критический путь, такты
			R1	R2	R3	R4	
1	j30_28.bas	1350739460	42	39	51	44	47
2	j30_28.bas	1001619525	28	40	43	39	63
3	j30_29.bas	1768635613	19	17	20	19	44
4	j30_29.bas	1037926147	17	15	17	17	51
5	j30_29.bas	401731488	15	14	16	16	48
6	j30_30.bas	677072906	30	28	26	33	34
7	j30_30.bas	712413196	23	23	22	20	44
8	j30_28.bas	890933679	28	25	34	42	46
9	j30_31.bas	1335687044	32	26	25	32	48
10	j30_31.bas	2012720068	23	25	28	30	46
11	j30_31.bas	1594625014	34	41	46	37	48
12	j30_31.bas	670867861	24	30	25	25	56
13	j30_32.bas	1264544214	29	39	51	43	48
14	j30_41.bas	377662011	18	13	16	14	45
15	j30_41.bas	1980474781	13	14	12	13	48

Информация тестового задания вносится в базу данных (БД) информационной системы (ИС) формирования календарных графиков мультипроектного планирования.

Информация таблицы 1 находится в 15 записях соответствующей таблицы ПРОЕКТ (рисунок 3). Информация о 450 работах агрегированных проектов размещена в таблице ЗАЯВКА (рисунок 3). Отношения следования/предшествования работ проектов представлены в таблице ИЕРАРХИЯ\_ЗАЯВОК (рисунок 3). Помимо 3 указанных таблиц с исходной информацией в БД находится 19 служебных таблиц для размещения в них расчетной информации, с которой работает комплекс из 27 программ на встроенном Visual Basic.

Первичная обработка исходной информации помощью инструкций SQL включает в себя:

- определение всех векторов путей графов сетей проектов с находящимися на них работами;
- установление критических путей графов.

Полученная информация размещается в соответствующих таблицах БД.

На рисунке 4 представлен граф сети одного из проектов тестового задания. Красным цветом выделены работы, находящиеся на критическом пути графа сети проекта.

Левая часть формы для «ручного» агрегирования (рисунок 5) представляет работы выбранного проекта в форме диаграммы Ганта. Работы критического пути выделены красным цветом. Оставшиеся работы размещены внутри интервалов их возможного перемещения.

В правой части (рисунок 5) представлены агрегации проекта по каждому из четырех ресурсов. Для каждого ресурса красной линией с цифровым обозначением показаны уровни выделяемых проекту объемов каждого такта. Превышение этих уровней в трех агрегациях связано с тем, что в расчетах используются начальные, не оптимизированные агрегации проектов.

На рисунке 6 в координатах длительность – тактовая потребность в ресурсе представлены последовательно снизу вверх все работы со 02-ой по 31-ую агрегированного представления рассматриваемого проекта. Вертикальное суммирование по каждому такту планирования дает агрегации проекта по ресурсам (рисунок 5).

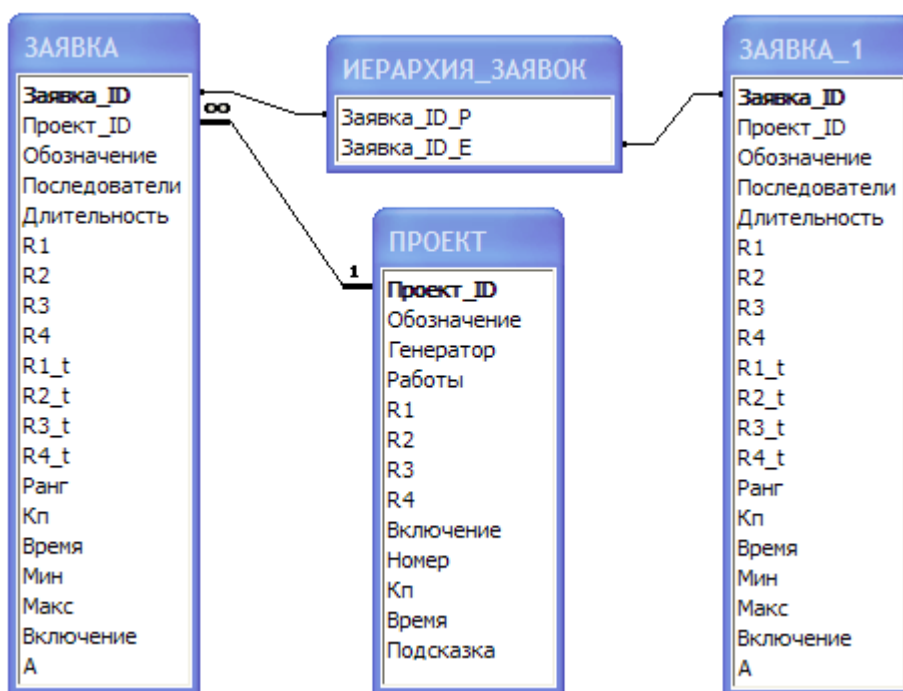


Рисунок 3 – Таблицы исходных данных ИС

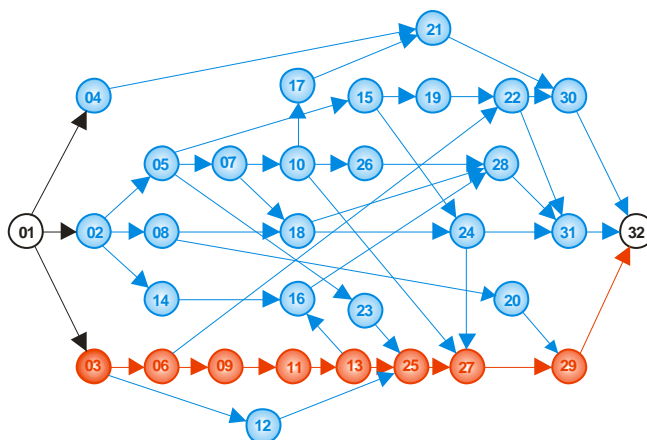


Рисунок 4 – Граф сети проекта № 12

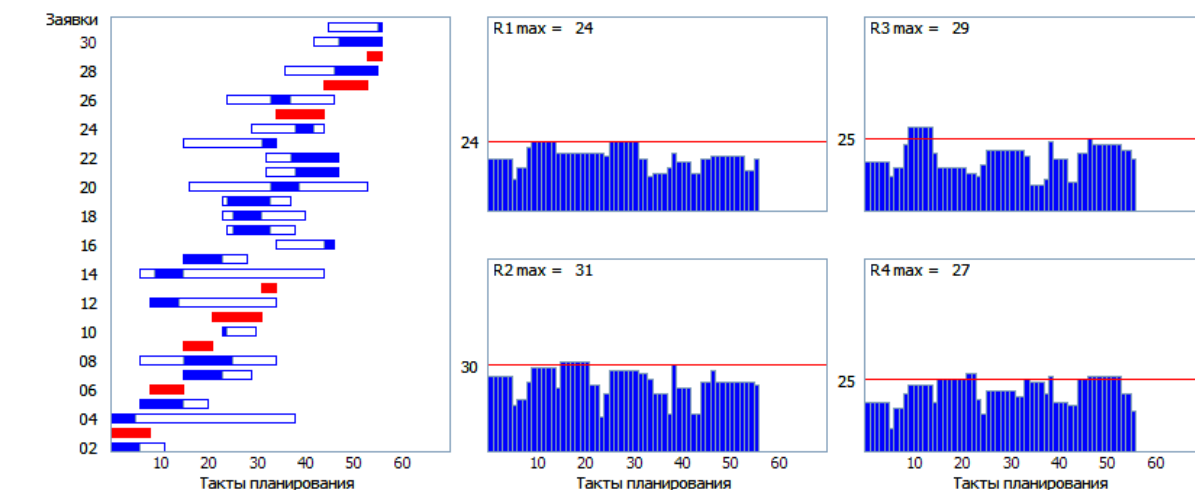


Рисунок 5 – Агрегирование проекта № 12

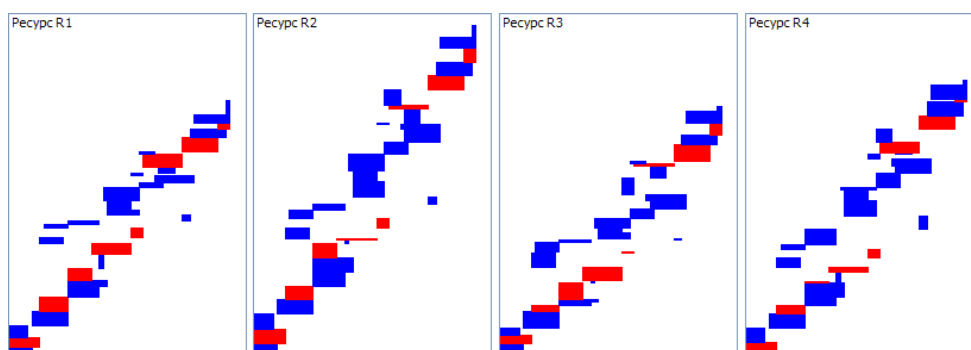


Рисунок 6 – Визуализация требуемых ресурсов для заявок/работ проекта № 12

### 3.1 Формирование начального календарного графика

Выбор проекта в начале каждого шага формирования начального расписания основан на концепции загруженности ресурсов. Критерии загруженности проектов имеют сложную структуру (рисунок 7) и формируются из скалярных оценок загруженности заявок проектов по каждому из четырех ресурсов.

Операция выбора проекта использует гипервекторный метод ранжирования [19, 20] критериев загруженности не включенных в начальный календарный график проектов (рисунок 8). Гипервекторное ранжирование является комбинацией последовательно проводимых многокритериальных и многовекторных ранжирований, что предопределило структуру критерия загруженности проекта (рисунок 7).

Алгоритм выбора наиболее загруженного проекта на каждом шаге формирования начального календарного графика используется в следующем виде (таблица 2).

Таблица 2

#### Алгоритм 1

- Для не включенных в начальный календарный график проектов (рисунок 5, а) выполняются следующие действия:
- 1) расчет оценок загруженности работ (3) проектов, не включенных в календарный график (рисунок 4, а);
  - 2) обратное многокритериальное ранжирование векторов загруженности работ (4) (рисунок 4, б);
  - 3) обратное многокритериальное ранжирование векторов загруженности путей графов (6) всех не включенных в календарный график проектов по рангам работ (5), находящихся на этих путях (рисунок 4, г);
  - 4) прямое многокритериальное ранжирование векторов загруженности проектов (8) по рангам векторов путей графов проектов (7) (рисунок 4, е). Первым будет определен самый загруженный проект среди оставшихся.

В таблицах 3–5 представлены выборочные результаты последовательных ранжирований в одном из циклов формирования начального календарного графика мультипроектного планирования. В таблице 5 определен наиболее загруженный проект. Голубым цветом в таблицах показаны скалярные компоненты ранжируемых векторов. Красным цветом представлены ранги векторов. Необходимо отметить, что в таблице 3 ранжируемые векторы имеют одинаковую размерность по количеству скалярных компонент, что позволяет прямое использование многокритериального ранжирования.

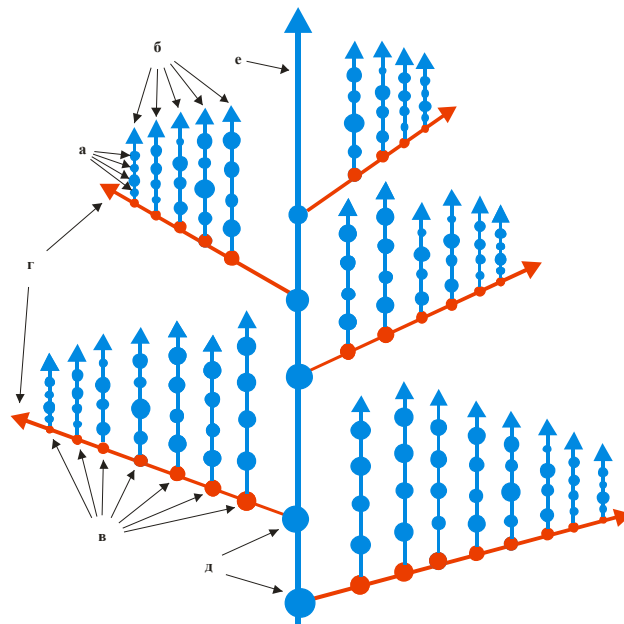


Рисунок 7 – Структура критерия загруженности проекта:

а – оценки загруженности работы по четырем ресурсам (2); б – критерии (векторы) загруженности работ (3); в – ранги работ (4); г – критерии (векторы) загруженности путей графа проекта (5); д – ранги векторов загруженности путей графа проекта (6); е – критерий (вектор) загруженности проекта (7)

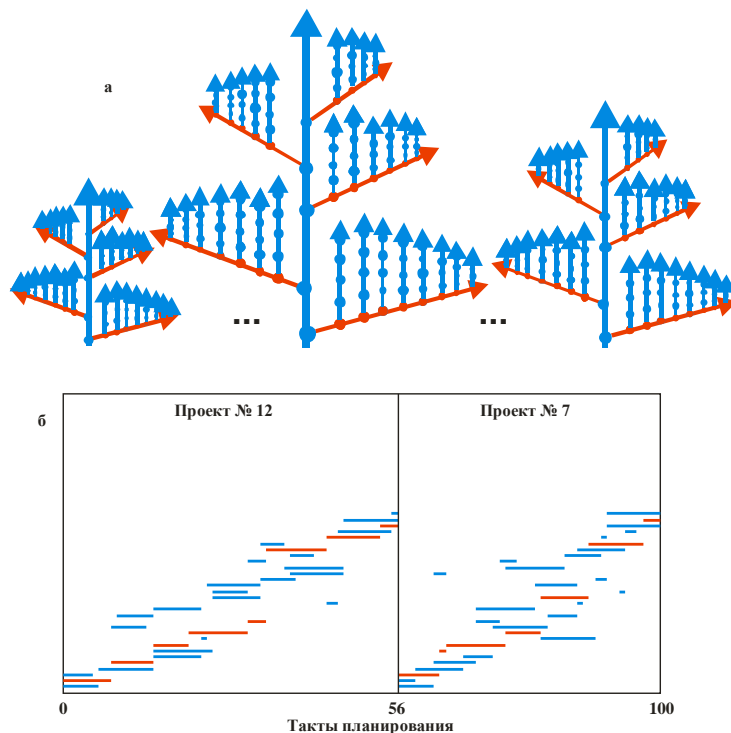


Рисунок 8 – Включенные и не включенные в начальный календарный график проекты: а – критерии загруженности проектов, не включенных в начальный календарный график; б – диаграммы Ганта двух первых включенных в начальный календарный график проектов в интервале расписания

Таблица 3

Результаты ранжирования для 10 наиболее загруженных заявок проектов

№ проекта	Заявка	Тактовая потребность заявки в ресурсах				Длительность, такты планирования	Скалярные компоненты вектора загруженности заявки				Ранг заявки
		R1	R2	R3	R4		R1	R2	R3	R4	
2	30	10	10	5	10	10	100	100	50	100	1
9	02	10	7	8	10	10	100	70	80	100	2
10	31	9	5	10	9	10	90	50	100	90	3
3	03	9	9	9	8	10	90	90	90	80	4
12	05	9	5	9	8	10	90	50	90	80	5
9	25	8	10	4	9	10	80	100	40	90	6
4	02	6	9	7	10	10	60	90	70	100	7
12	07	6	10	10	7	9	54	90	90	63	8
1	10	9	3	9	9	9	81	27	81	81	9
5	13	5	7	8	10	10	50	70	80	100	10

Векторы таблицы 4 имеют разную размерность [23], поэтому для их многокритериального ранжирования значениям недостающих скалярных компонент необходимо присвоение фиктивных значений. В зависимости от решаемой задачи в качестве таких значений присваиваются:

- минимально возможное значение при определении «максимального» вектора;
- максимально возможное значение при определении «минимального» вектора.

Так как проекты тестового задания имеют 356 векторов путей, то для их ранжирования значениям недостающих скалярных компонент присваивается значение 1000.

Таблица 4

Результаты ранжирования для 10 наиболее загруженных путей графов проектов

№ проекта	Путь ID	Отсортированные по возрастанию ранги заявок путей графов проектов									Ранг пути
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
9	162	2	6	21	94	176	263	273	296	318	1
9	161	2	6	21	86	179	263	273	296	318	1
5	84	8	12	26	43	103	115				2
11	204	40	44	63	78	88	177	261			3
13	248	14	35	77	82	168	234	254			4
5	86	8	25	26	115	148	274	322	358		5
13	251	14	35	36	77	204	283				6
13	250	48	60	82	106	234	237	254	333		7
13	249	48	60	89	106	225	237	254	333		8
13	252	14	35	77	204	234	254	283			9
10	182	3	59	62	121	185	297	306			10

Результаты ранжирования проектов по критерию загруженности

№ проекта	Отсортированные по убыванию ранги первых восьми наиболее загруженных векторов путей в графах проектов								Ранги проектов
12	202	201	200	187	146	141	130	97	1
7	285	251	222	204	186	174	156	153	2
5	310	282	259	257	211	190	182	181	3
13	324	285	268	216	213	209	205	197	4
11	264	263	242	231	228	225	219	218	5
3	316	273	272	250	235	221	220	208	6
4	317	292	261	253	251	244	232	230	7
6	303	279	258	247	245	239	237	192	8
2	332	289	284	256	255	229	194	188	9
9	325	298	280	271	249	241	214	212	10
10	332	301	299	277	266	248	206	196	11
8	331	328	294	278	270	246	236	210	12
1	321	311	310	306	302	295	293	291	13
14	327	326	323	318	315	313	312	308	14
15	330	329	322	320	319	314	309	300	15

Для очередного наиболее загруженного проекта  $p_{ni+1}$  определяются все возможные в соответствии с обязательными ограничениями (2) начальные времена включения проекта в начальный календарный график. Определение начального времени включения проекта в начальный календарный график осуществляется прямым многокритериальным ранжированием векторов (9) для возможных начальных времен включения (рисунок 9). Использование выражения (9) прежде всего определяется формой представления проекта в календарном графике мультипроектного планирования, то есть его агрегированным представлением.

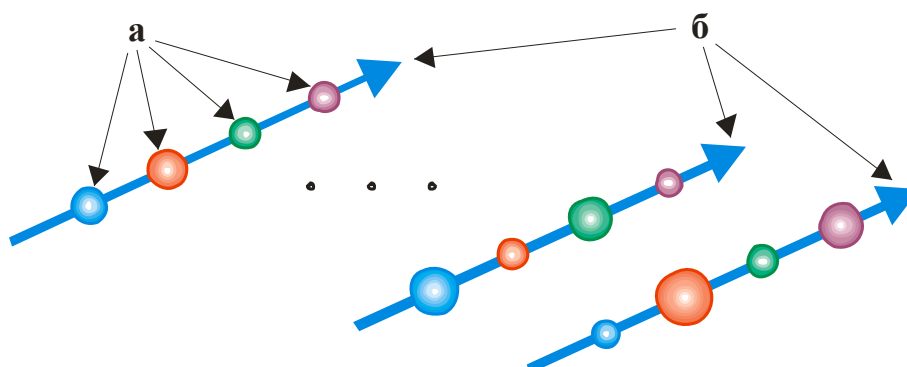


Рисунок 9 – Векторы календарного графика (9) для начальных тактов включения:  
 а – максимальные тактовые объемы потребляемых ресурсов в календарном графике; б – векторы календарного графика

Алгоритм выбора начального времени  $TI_{ni+1}$  включения проекта  $p_{ni+1}$  предлагается в следующем виде.



Алгоритм 2

- 5) для наиболее загруженного проекта определение набора возможных начальных времен (начальных тактов планирования при потактовом смещении проекта внутри интервала расписания) для включения проекта в начальный календарный график с учетом ограничений (2);
- 6) для всех времен включения заявок проекта определение максимальных значений каждого ресурса в текущем календарном графике с формированием множества векторов (9);
- 7) прямое многокритериальное ранжирование векторов (9). Индекс  $j$  доминирующего вектора определяет начальное время включения проекта к календарный график;
- 8) включение проекта в начальный календарный график в выбранное начальное время – замена значений атрибутов «Время» (рисунок 3) таблиц ПРОЕКТ и ЗАЯВКА для включаемого проекта.

В таблице 7 представлены результаты многокритериального ранжирования векторов равномерности начальных тактов очередного наиболее загруженного проекта № 5, включаемого третьим в текущий календарный график (рисунок 8, б).

Таблица 7

Результаты ранжирования начальных тактов включения проекта

Начальный такт включения	Максимальные значения ресурсов – вектор равномерности такта				Ранг начального такта	Начальный такт включения	Максимальные значения ресурсов – вектор равномерности такта				Ранг начального такта
	R1	R2	R3	R4			R1	R2	R3	R4	
6	59	57	53	59	1	39	65	58	51	60	19
14	61	57	52	59	2	23	61	59	55	60	20
7	57	57	56	60	3	20	60	59	57	60	21
18	56	57	57	60	4	40	70	58	51	60	22
4	59	60	53	59	5	35	64	60	48	60	23
5	59	60	53	59	5	34	64	60	50	60	24
30	60	58	49	60	6	33	64	60	50	60	25
29	60	58	50	60	7	36	65	60	48	60	26
31	60	59	50	60	8	37	65	60	48	60	26
8	60	57	56	60	9	41	74	59	51	60	27
9	60	57	56	60	9	42	74	59	51	60	27
13	61	57	53	60	10	26	64	59	55	60	28
16	61	56	57	60	11	52	64	61	52	60	29
17	61	56	57	60	11	28	65	60	53	60	30
24	61	58	55	60	12	27	65	60	53	60	30
25	61	58	55	60	12	3	62	60	53	61	31
21	60	59	55	60	13	2	62	60	53	61	31
22	60	59	55	60	13	51	66	61	52	60	32
12	61	57	56	60	14	46	78	59	57	60	33

10	61	57	56	60	14	50	72	61	54	60	34
11	61	57	56	60	14	43	74	60	57	60	35
19	60	58	57	60	15	44	74	60	57	60	35
32	61	60	50	60	16	49	72	61	57	60	36
15	61	57	57	60	17	45	78	60	57	60	37
0	58	60	53	61	18	47	78	63	57	60	38
1	58	60	53	61	18	48	78	64	57	60	39
38	65	58	51	60	19						

Таким образом, окончательный вариант алгоритма формирования начального календарного графика мультипроектного планирования имеет следующий вид.

Таблица 8

Алгоритм формирования начального календарного графика

<p>До тех пор пока не все проекты включены в расписание цикличное выполнение следующих действий:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. расчет оценок загруженности работ (3) проектов, не включенных в календарный график (рисунок 4, а);</li> <li>2. обратное многокритериальное ранжирование векторов загруженности работ (4) (рисунок 4, б);</li> <li>3. обратное многокритериальное ранжирование векторов загруженности путей графов (6) всех не включенных в календарный график проектов по рангам работ (5), находящихся на этих путях (рисунок 4, г);</li> <li>4. прямое многокритериальное ранжирование векторов загруженности проектов (8) по рангам векторов путей графов проектов (7) (рисунок 4, е). Первым будет определен самый загруженный проект среди оставшихся.</li> <li>5. для наиболее загруженного проекта определение набора возможных начальных времен (начальных тактов планирования при потактовом смещении проекта внутри интервала расписания) для включения проекта в начальный календарный график с учетом ограничений (2);</li> <li>6. для всех времен включения заявок проекта определение максимальных значений каждого ресурса в текущем календарном графике с формированием множества векторов (9);</li> <li>7. прямое многокритериальное ранжирование векторов (9). Индекс <math>j</math> доминирующего вектора определяет начальное время включения проекта к календарный график;</li> <li>8. включение проекта в начальный календарный график в выбранное начальное время – замена значений атрибутов «Время» таблиц ПРОЕКТ и ЗАЯВКА для включаемого проекта.</li> </ol>
--

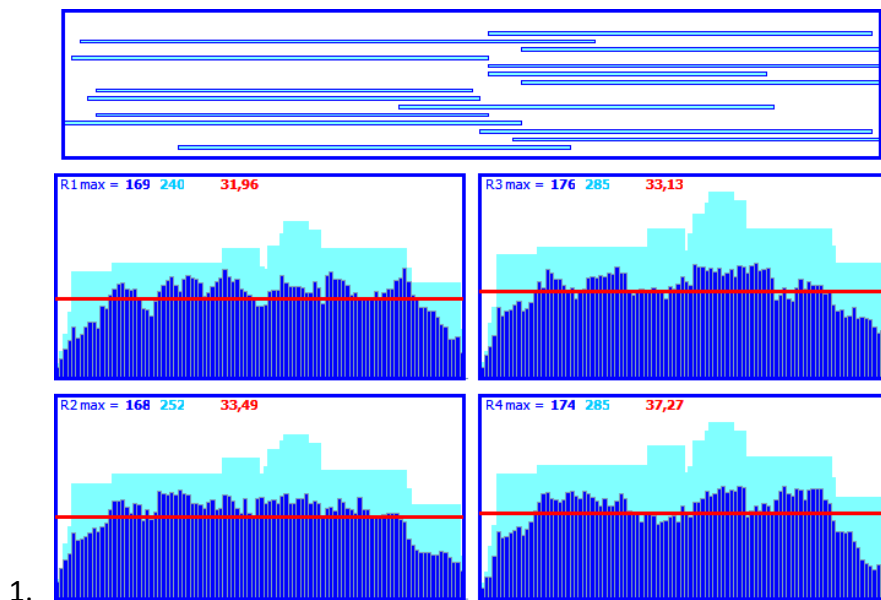
На рисунке 10 представлены визуализированные результаты формирования начального календарного графика мультипроектного планирования как расписания для сетевых структур заявок при принятом интервале расписания и принятых агрегациях проектов.

В верхней части рисунка представлена диаграмма Ганта для 15 проектов (таблица 1) тестового задания при принятом интервале расписания в 100 тактов планирования. В нижней части рисунка 10 показаны диаграммы потребления (синий цвет) и выделения (голубой цвет) каждого из четырех ресурсов на каждом такте планирования. Цифрами в диаграммах ресурсов представлены максимальные значения тактового потребления и выделения ресурса. Третья цифра показывает среднеквадратичное отклонение от среднего значения (показано красной линией). Все результаты и их визуализация получены информационной системой под управлением СУБД, что соответствует первой из используемых концепций.

Ступенчатый характер диаграммы выделяемых ресурсов (рисунок 10) связан с выделением заданных объемов ресурсов только в пределах выполнения каждого проекта. Очевидно, что для задач мультипроектного планирования необходимо выделение

ресурсов на весь мультипроект. Как следствие, появляются две задачи мультипроектного планирования [24], имеющие экономический характер:

- 1) нахождение оптимального интервала расписания (длительности календарного графика) при заданных объемах выделяемых ресурсов;
- 2) нахождение оптимальных объемов выделяемых ресурсов при заданном интервале расписания.



1.

Рисунок 10 – Начальный календарный график в форме диаграммы Ганта и потаковых диаграмм выделяемых (голубой) и потребляемых (синий) ресурсов

### 3.2 Оптимизация начального календарного графика

Выбор наиболее неравномерного проекта в методе оптимизации начального календарного графика основан на оценках и критериях равномерности (11–15) всех проектов текущего графика. Так как критерии (векторы) равномерности проектов зависят от текущего календарного графика, то необходим расчет оценок равномерности и формирование критериев равномерности проектов в начале каждого шага оптимизации. На каждом шаге оптимизации осуществляется выбор наиболее неравномерного проекта.

Оценки равномерности проекта рассчитываются для каждого такта планирования в пределах критического пути проекта с учетом других проектов календарного графика. На рисунок 11 представлены результаты расчета тактовых оценок равномерности (11) для всех 15 проектов в текущем календарном графике в пределах интервала расписания по одному из четырех ресурсов.

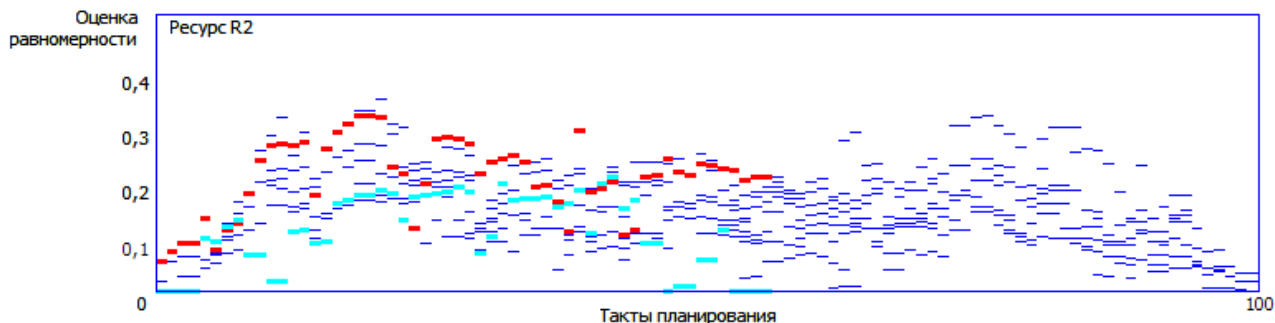


Рисунок 11 – Тактовые оценки равномерности проектов календарного графика по второму ресурсу: красным цветом выделены оценки самого неравномерного проекта; зеленым – самого равномерного

Полученные значения тактовых оценок равномерности формируют критерии (векторы) равномерности по каждому ресурсу, то есть проект будет характеризоваться четырьмя векторами. Для выбора наиболее неравномерного проекта календарного гра-

фика использован метод многовекторного ранжирования [18], в соответствии с которым разработана структура критерия равномерности проекта (рисунок 12).

Алгоритм выбора наиболее неравномерного проекта календарного графика предлагается в следующем виде.

Таблица 9

Алгоритм 3

- Для всех проектов календарного графика (рисунок 13) выполняются следующие действия:
- 1) расчет оценок равномерности проектов (11) по каждому ресурсу (рисунок 12, а);
  - 2) прямое многокритериальное ранжирование векторов равномерности по каждому ресурсу (12) неоптимизированных проектов по каждому ресурсу (рисунок 12, б);
  - 3) прямое многокритериальное ранжирование векторов равномерности проектов по рангам векторов равномерности (14) по каждому ресурсу (рисунок 12, г).

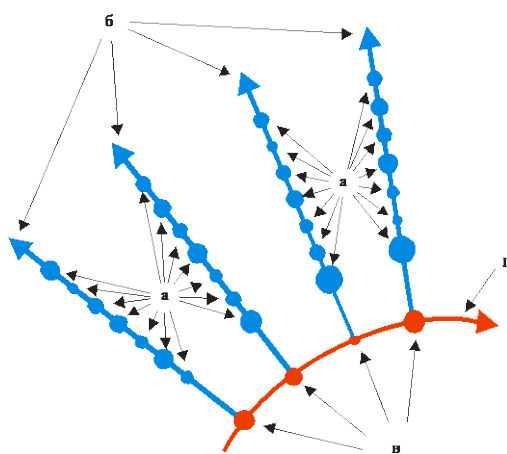


Рисунок 12 – Структура критерия равномерности проекта:

а – оценки равномерности проекта по каждому из четырех ресурсов для каждого такта планирования критического пути; б – критерии (векторы) равномерности проекта по каждому из четырех ресурсов; в – ранги векторов равномерности проекта по каждому из четырех ресурсов; г – критерий (вектор) равномерности проекта

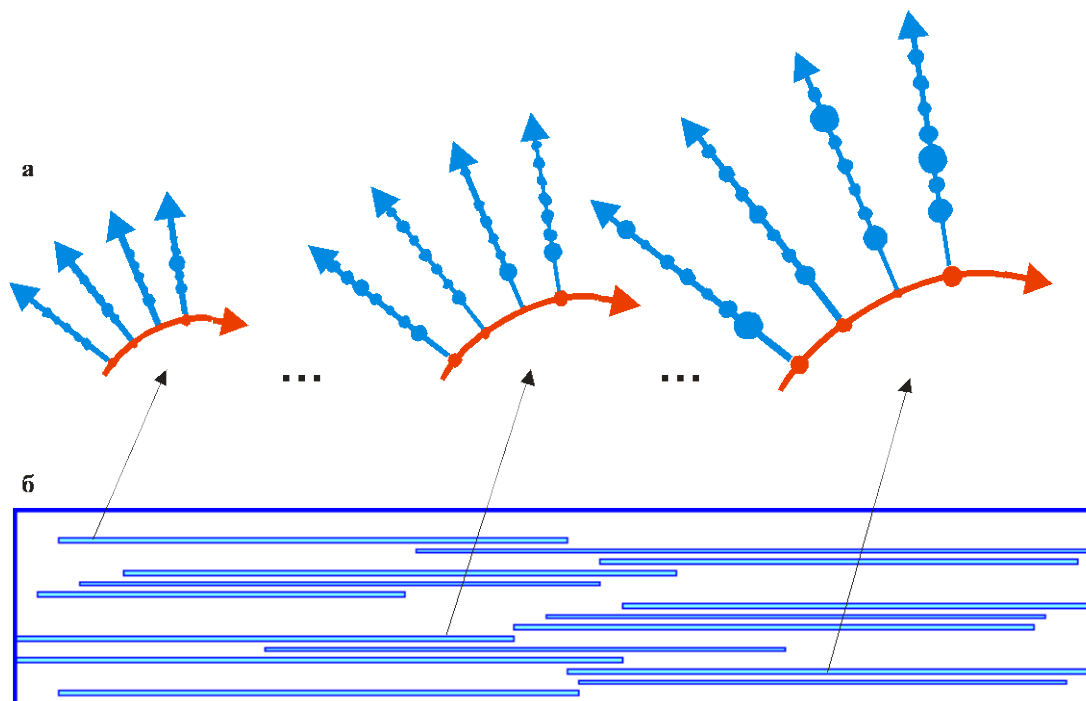


Рисунок 13 – Критерии (векторы) равномерности проектов календарного графика:

а – критерии неравномерности проектов календарного графика;  
б – диаграмма Ганта проектов

Результаты первого шага оптимизации начального календарного графика представлены в таблице 10.

Таблица 10

Результаты ранжирования по выбору наиболее неравномерного проекта

№ проекта	Ранги векторов равномерности проектов по ресурсам				Ранги проектов
	R1	R2	R3	R4	
12	1	1	6	1	1
5	2	2	1	2	2
3	4	5	3	11	3
4	3	4	8	6	4
13	5	7	3	7	5
11	6	3	4	12	6
7	9	3	11	13	7
9	8	6	12	3	8
2	11	8	5	10	9
6	12	5	14	4	10
10	10	9	9	9	11
1	14	9	10	5	12
8	15	10	2	8	13
14	7	10	7	15	14
15	13	9	13	14	15

Как показывают данные таблицы 10 наиболее неравномерным проектом начального календарного графика определен проект № 12.

Для очередного наиболее неравномерного проекта  $p_{ni+1}$  определяются все возможные в соответствии с обязательными ограничениями (2) начальные времена перестановки проекта в календарном графике. Определение начального времени  $TI_{ni+1}$  перестановки проекта  $p_{ni+1}$  в календарном графике осуществляется прямым многокритериальным ранжированием векторов (15) для возможных начальных времен включения (рисунок 14).

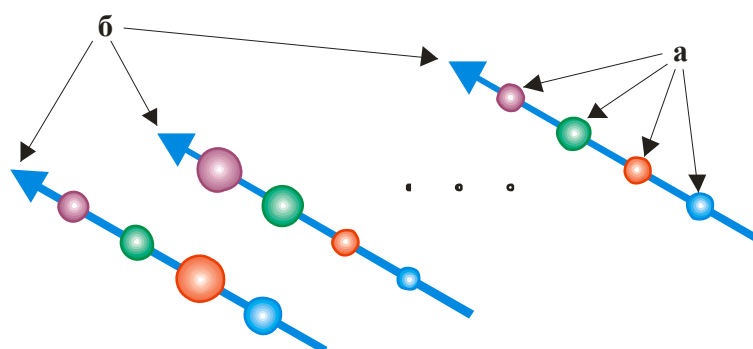


Рисунок 14 – Векторы календарного графика (15) для начальных тактов перестановки проекта: а – среднеквадратичные отклонения потребления ресурсов в календарном графике; б – векторы календарного графика

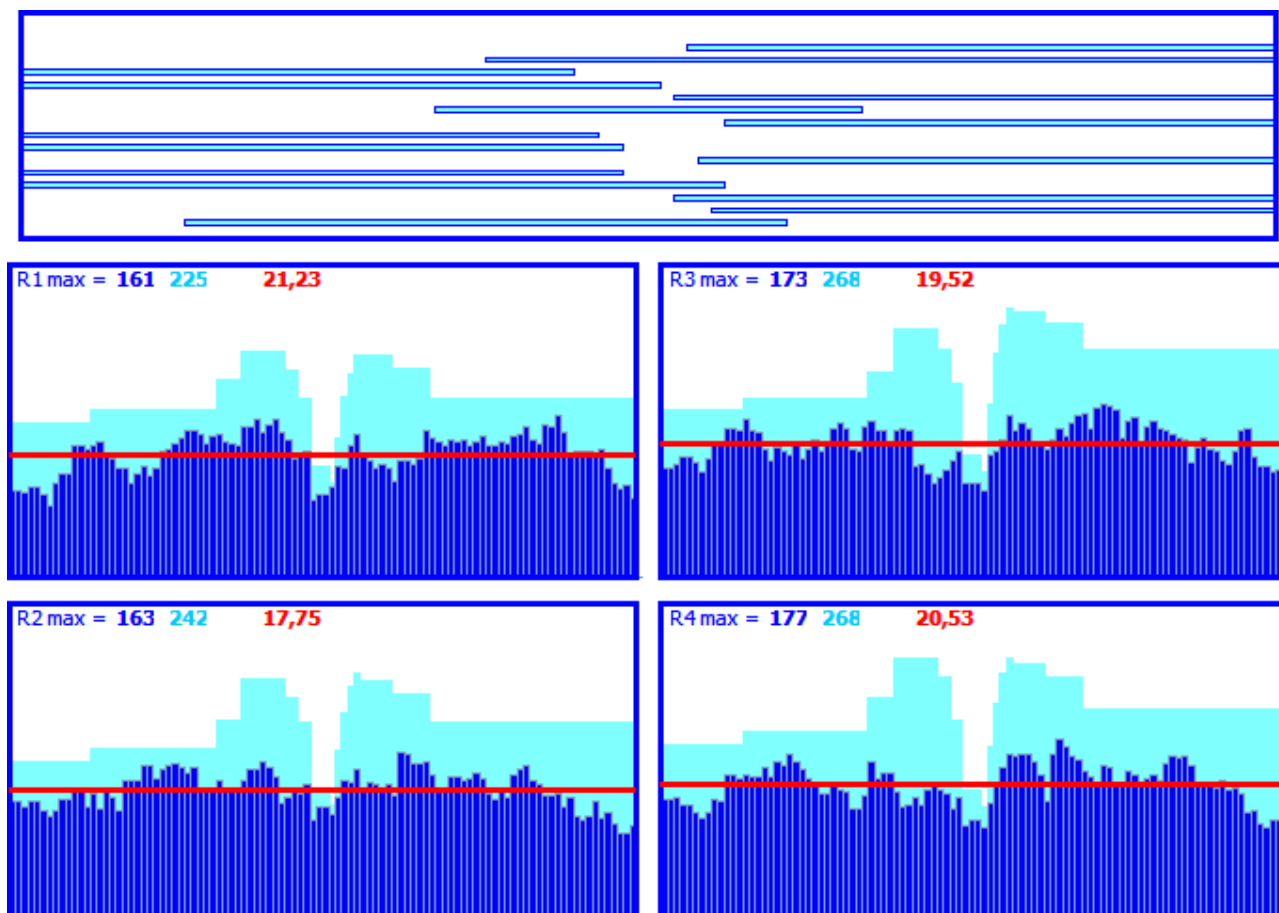
Алгоритм выбора начального времени  $TI_{ni+q}$  перестановки проекта  $p_{ni+1}$  предлагается в следующем виде.

Таблица 11

Алгоритм 4

- 4) для наиболее неравномерного проекта определение набора возможных начальных времен (начальных тактов планирования при потактовом смещении проекта внутри интервала расписания) для перестановки проекта в календарном графике с учетом ограничений (2);
- 5) для всех времен перестановки проекта определение среднеквадратичных отклонений потребления ресурсов в календарном графике с формированием множества векторов (15);
- 6) прямое многокритериальное ранжирование векторов (15). Индекс  $j$  доминирующего вектора определяет начальное время перестановки проекта к календарному графике;
- 7) перестановка проекта в календарном графике в выбранное начальное время – замена значений атрибутов «Время» (рисунок 3) таблиц ПРОЕКТ и ЗАЯВКА для переставляемого проекта.

Объединение алгоритмов 3 и 4 (таблицы 9, 11) дает алгоритм одного прохода оптимизации календарного графика мультипроектного планирования.



**Рисунок 15 – Оптимизированный после трех проходов календарный график в форме диаграммы Гранта и требуемых ресурсов на каждом такте планирования**

Анализ начального календарного графика (рисунок 10) и оптимизированного календарного графика (рисунок 15) показывает:

- 1) уменьшение значений среднеквадратичных отклонений в оптимизированном календарном графике;



2 применение неоптимизированных агрегаций проектов не позволило получить еще большее уменьшение значений среднеквадратичных отклонений;

3 использование целевой функции (10) дало побочный эффект – снижение значений максимальных тактовых объемов потребляемых и выделяемых ресурсов;

4 повышение уровня потребления ресурсов у границ интервала расписания и, как следствие, смещение большинства проектов (рисунок 15) к границам интервала расписания;

5 целевую функцию (1), используемую при формировании начального календарного графика, необходимо заменить на (10) с использованием среднего уровня потребляемых ресурсов включенных в начальный календарный график проектов.

Пункты 2 и 5 намечают пути дальнейших исследований.

### **Заключение**

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- осуществлена формализация задач формирования и оптимизации календарного графика для сетевых моделей исходных требований;
- представлены общие подходы и алгоритмы решения задач формирования календарных графиков с использованием методов ранжирования теории принятия решений;
- разработана информационная система формирования календарных графиков для решения с ее помощью различных задач мультипроектного планирования;
- представлены результаты формирования календарных графиков средствами информационной системы;
- намечены пути дальнейших исследований по агрегированию проектов и применению других целевых функций.

### **Литература**

1. Бурков В.Н., Квон О.Ф., Цитович Л.А. Модели и методы мультипроектного управления. М.: Препринт / ИПУ РАН, 1997. 62 с.
2. Kolish R. Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: theory and computation // Eur. J. Oper. Res. 1996. V. 90. № 2. P. 320–333.
3. Баркалов П.С., Буркова И.В., Глаголев А.В. и др. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами. М.:ИПУ РАН, 2002. 65 с.
4. Kane H., Tissier A. A resource allocation model for multi-project management // Proc. of MOSIM'12 9<sup>th</sup> conference internationale de modelisation, optimisation et simulation Bordeaux, France, 2012. 8 p.
5. Клеванский Н.Н. Основные концепции реализации задач формирования расписаний // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Образовательные ресурсы и технологии, М., 2014. № 2 (5). С. 9–21.
6. Клеванский Н.Н., Михайлова М.М. Подходы к формированию расписаний для иерархий заявок // Доклады Академии Военных наук. 2012. № 5(54). С. 77–82.
7. Клеванский Н.Н., Красников А.А. Задача формирования календарных графиков мультипроектного планирования. Доклады Академии Военных наук. 2013. № 3(58). С. 89–93.
8. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Физический факультет МГУ, 2011. 222 с.
9. Клеванский Н.Н., Федоров В.В., Кашин С.С. Критерии равномерности в задачах расписаний // Интеллектуальные системы: Труды X межд. симп. М.: РУСАКИ, 2012. С. 394–397.
10. Клеванский Н.Н., Федоров В.В. Методы теории принятия решений в задачах расписаний // Доклады Академии Военных наук. 2011. № 5(49). С. 60–68.
11. Singh A. Resource Constrained Multi-Project Scheduling with Priority Rules & Analytic Hierarchy Process // Proc. of 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, Procedia Engineering 69 ( 2014 ), pp. 725–734.
12. Кочетов Ю.А., Столяр А.А. Новые жадные эвристики для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами // Дискретный анализ и исследование операций. Новосибирск, 2005. Сер. 2. Т. 12. № 1. С. 12–36.

13. Прилуцкий М.Х., Власов В.С. Построение оптимальных по быстродействию расписаний в канонических системах «конвейер-сеть» // Информационные технологии. 2011. № 3. С. 26–31.
14. Feo T.A., Resende M.G.C. Greedy randomized adaptive search procedures // Journal of Global Optimization. 1995. Issue 2. P. 109–133.
15. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 256 с.
16. Подиновский В.В. Анализ задач многокритериального выбора методами теории важности критериев при помощи компьютерных систем поддержки принятия решений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 64–68.
17. Saaty T. L., Analytical Hierarchy Process, McGraw Hill Company, NY, USA, 1980.
18. Сафронов В. В. Сравнительная оценка методов «жесткого» ранжирования и анализа иерархий в задаче гипервекторного ранжирования систем // Информационные технологии. 2011. № 7. С. 8–13.
19. Сафронов В. В. Гипервекторное ранжирование сложных систем // Информационные технологии. 2003. № 5. С. 23–27.
20. Сафронов В.В. Построение истинных кортежей Парето в задачах гипервекторного ранжирования систем // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 4(8). С. 11–18.
21. Сафронов В.В., Ведерников Ю.В. Характеристика метода «жесткого» ранжирования // Информационные технологии. 2007. № 11. С. 17–21.
22. Kolish R., Sprecher A. PSPLIB – A project scheduling library // European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 96. P. 205–216.
23. Клеванский Н.Н., Кашин С.С., Кравцов Е.Ф. Ранжирование векторов разной размерности в задачах расписаний // Мехатроника, автоматизация, управление: Материалы VII научно-технической конференции СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С.220–223.
24. Mohring R. H. (). Minimizing costs of resource requirements in project networks subject to a fixed completion time. Operations Research, 1984. № 32. P. 89–120.

### Multi-project scheduling problems techniques

*Nicolay Nicolaevich Klevansky, professor, Saratov State Agrarian University named by N.I. Vavilov*

*Andrey Alekseevich Krasnikov, postgraduate, Saratov State Agrarian University named by N.I. Vavilov*

*In the article basic concepts for multi-project scheduling problem are presented. The realizations are used on set of PSPLib tasks. The basic criteria for choice operations are demanded. Greedy algorithms is presented.*

*Key words: timetabling, demand, event, multi-project scheduling, greedy algorithm, ranking methods*

УДК 519.113.115+681.3

## ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В СФЕРЕ ТРАНСПОРТА

*Игорь Наумович Розенберг, профессор, д-р техн. наук,  
заместитель генерального директора,*

*E:mail: ig.rozenb2012@yandex.ru,*

*НИИ автоматизированных систем на железнодорожном транспорте,  
<http://www.vnias.ru>*

*В статье излагаются особенности дополнительного образования в сфере транспорта. Показано деление этого обучения на нормативное и креативное. Показана иерархия структуры учебного материала. Раскрыто содержание разных видов тестирования при дополнительном образовании. Показана необходимость учета когнитивных факторов в обучении. Отмечено значение пространственной информации для ситуационного обучения. Показано, что гибкое обучение является наиболее эффективным.*