

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ НАЗНАЧЕНИЙ

Ю.Т. Зырянов, О.А. Коновалов, А.К. Малыков

Рассмотрена задача рационального распределения ограниченных ресурсов по зависимым операциям в организационно-технических системах. Предложены модернизированный метод последовательных назначений и структура системы управления рациональным распределением ресурсов, позволяющая осуществлять управление и контроль выполнения проекта.

**Ключевые слова:** распределение ресурсов, проект, система управления, зависимые операции, сетевая модель.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития телекоммуникационной и электронно-вычислительной техники позволяет автоматизировать широкий класс функций управления распределением ресурсов. Для решения комплекса организационно-технических взаимосвязанных задач с помощью единой системы управления рациональным распределением ресурсов (СУРРР) необходимо соответствующее алгоритмическое обеспечение. В частности, применение в рамках такой системы моделей и методов сетевого планирования и управления предполагает решение задачи оптимального распределения организационно-технических ресурсов по зависимым операциям [1, 2].

Анализ известных методов распределения ресурсов показывает, что они недостаточно эффективны для зависимых операций. Оптимизация сетевых моделей без календарной увязки сроков не обеспечивает решение всей задачи оптимизации плановых расчетов. Применение классических методов математического программирования отрицательно сказывается на достоверности результатов из-за значительных ограничений на факторное пространство и область изменения целевой функции, а применение эвристических приемов — к потере управления уже на стадии планирования [3].

Существующие решения не в полной мере учитывают такие факторы как уровень подготовки специалистов, их взаимозаменяемость, обеспеченность инструментом (принадлежностями, приспособлениями, сервисной аппаратурой, средствами диагностирования) при их перераспределении. Задача нахождения ресурсных связей многовариантна, осложнена переменной скоростью выполнения операций и вариативной структурой графа.

В настоящей статье используется терминология теории графов и управления проектами. *Проектом* будем называть некоторый процесс изменений (не рутинный процесс), требующий специальных методов проектного управления. Под *событием* понимается факт начала и (или) окончания операций. *Операция* — процесс, подлежащий выполнению и принадлежащий проекту [4, 5].

## 1. ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимо выполнить проект по подготовке к функционированию некоторой сложной системы, состоящий из множества зависимых и независимых операций. Технологическая зависимость между операциями задается в виде сети.

Предлагается рассматривать детерминированную модель сетевого графика, для которой необходимо задать первоначальный план распределе-

ния ограниченных организационно-технических ресурсов. Каждая операция выполняется с переменной интенсивностью однородными или разнородными специалистами, распределение которых может быть неоднократным. Перераспределение ресурсов с одной операции на другую не связано с временными затратами, и операции можно прерывать до их окончания. Результатом решения служит ресурсный граф переменной структуры.

Пусть на реализацию проекта выделено ограниченное количество ресурсов  $S$  различных типов  $h$ . Условимся, что событие  $j$  непосредственно следует за событием  $i$ ;  $L$  — множество операций, заранее заданных списком,  $(i, j) \in L$ ;  $f_{(ij)}$  — множество различных типов специалистов, которые назначаются и могут выполнить  $l_{(ij)}$ -ю операцию соответственно;  $E^f$  — множество целевых событий проекта, для каждого из которых срок выполнения превышает заданный;  $H$  и  $Q$  — множества операций на сетевом графе с каждой из которых будут сниматься и соответственно добавляться специалисты хотя бы одного  $h$ -го типа;  $\Delta_{(ij)}^*$  — резерв времени  $l_{(ij)}$ -й операции при заданном распределении с учетом директивного срока  $\gamma$ -го целевого события,  $\gamma \in E^f$ ;  $N_{h(ij)}$  и  $N_{h(ij)}^*$  — минимально и максимально возможное число специалистов  $h$ -го типа соответственно,  $h \in f_{(ij)}$ ;  $C_{(ij)}$  — доля выполненной части  $l_{(ij)}$ -й операции;  $Z_{(ij)}$  — множество ресурсных условий (данное множество включает операции, с каждой из которых ресурсы переходят на выполнение  $l_{(ij)}$ -й операции);  $x_{(ij)}$  — число специалистов, приступивших к выполнению  $l_{(ij)}$ -й операции;  $\lambda_{h(ij)}$  — производительность специалиста  $h$ -го типа;  $K_\Sigma$  — суммарный коэффициент ( $K_\Sigma \in [0; 1]$ ), определяется экспертными методами и зависит от факторов внешней среды;  $T_\gamma^{\text{дир}}$  — директивный срок  $\gamma$ -го целевого события;  $t_{(ij)}$  — планируемая продолжительность выполнения операции при заданном распределении специалистов;  $t_{\gamma(ij)}^{\min}$  и  $t_{\gamma(ij)}^{\max}$  — минимальное и максимальное возможное время выполнения  $l_{(ij)}$ -й операции соответственно,  $R$  — номенклатура деталей, необходимых для полной комплектации изделия (системы) согласно технологической документации при выполнении множества операций  $L$  специалистом  $h$ -го типа,  $r = 1, \dots, R$ ;  $Q_{(ij)hr}$  —  $g$ -й вид инструмента, необходимый для выполнения  $l_{(ij)}$ -й операции над деталью  $r$ -го наименования специалистом  $h$ -го типа,  $Q_{(ij)hr} = \{Q_{(ij)hr} / g = 1, \dots, G_{(ij)}\}$ ;  $G_{(ij)}$  — объем инструмента, необходимого для выполнения  $l_{(ij)}$ -й операции;  $t_{(ij)hr}$  — время работы  $g$ -м видом инструмента, не-

обходимого для выполнения  $l_{(ij)}$ -й операции над деталью  $r$ -го наименования специалистом  $h$ -го типа;  $V_{(ij)r}$  — число деталей  $r$ -го наименования, необходимых для комплектации изделия при выполнении  $l_{(ij)}$ -й операции.

Для выполнения операций проекта необходимо учитывать организационно-технические ресурсы в комплексе. Численность наименований инструмента, необходимого специалистам для выполнения операций проекта, определяется из следующего выражения [6]:

$$Q_{\text{н.и}} = \sum_{r=1}^R \sum_{l_{(ij)}=1}^L \sum_{g=1}^{G_{(ij)}} \delta_{(ij)hr} Q_{(ij)hr} g,$$

где  $\delta_{(ij)hr}$  — вспомогательная переменная,

$$\delta_{(ij)hr} = \begin{cases} 1, & \text{если для комплектации детали} \\ & r\text{-го наименования на } l_{(ij)}\text{-й операции} \\ & \text{выбран специалист } h\text{-го типа;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Каждый инструмент характеризуется набором параметров:  $t_{(ij)гд.н}$  — длительность подготовки и наладки  $g$ -го инструмента на  $l_{(ij)}$ -й операции;  $t_{(ij)гд.к}$  — длительность комплектации  $g$ -го набора инструмента на  $l_{(ij)}$ -й операции;  $t_{(ij)гд.п}$  — планируемая длительность работы специалиста  $g$ -м инструментом на  $l_{(ij)}$ -й операции.

Объем инструмента, необходимого для реализации  $l_{(ij)}$ -й операций специалисту  $h$ -го типа [6]:

$$E_{h(ij)} = \sum_{r=1}^R \sum_{l_{(ij)}=1}^L \sum_{g=1}^{G_{(ij)}} \frac{\delta_{(ij)hr} Q_{(ij)hr} g t_{(ij)hr} V_{(ij)r}}{t_{(ij)гд.п}}.$$

Для рационального распределения специалистов различного уровня подготовки  $x_{h(ij)}(Z_{(ij)})$  по операциям сетевого графика при обеспеченности их необходимым инструментом необходимо найти такое их перераспределение,  $x_{h, i_1(ij)}^*(Z_{(ij)})$ ,  $i_1 = 1, 2, \dots, M_{(ij)}^*$ ,  $h \in f_{(ij)}$  ( $M_{(ij)}^*$  — число частей  $l_{(ij)}$ -й операции), которое обеспечит максимум функции

$$F_\Sigma^* = - \sum_{\gamma \in E^f} \left( \sum_{(ij) \in T_\gamma^{\text{кр}}} \sum_{i_1=1}^{M_{(ij)}^*} \frac{C_{i_1(ij)}^* (1 + K_r)}{\sum_{h \in f_{(ij)}} \lambda_{h(ij)} x_{h, i_1(ij)}^*(Z_{(ij)}) E_{h(ij)}} - T_\gamma^{\text{дир}} \right); \quad (1)$$

при технологических, организационных и ресурсных ограничениях:

$$t_{\gamma(ij)}^{\min} \leq t_{\gamma(ij)} \leq t_{\gamma(ij)}^{\max}, \quad \gamma \in E^f, \quad l_{(ij)} \in L; \quad (2)$$



$$\left\{ \begin{aligned} t_{\gamma(ij)}^{\min} &\leq \sum_{i_1=1}^{M_{(ij)}^*} t_{\gamma i_1(ij)}^* \leq t_{\gamma(ij)} + \Delta_{\gamma(ij)}^*, \gamma \in E^f, l_{(ij)} \in H; \\ t_{\gamma(ij)}^{\min} &\leq \sum_{i_1=1}^{M_{(ij)}^*} t_{\gamma i_1(ij)}^* \leq t_{\gamma(ij)}, \gamma \in E^f, l_{(ij)} \in (Q/H); \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$N_{h(ij)} \leq x_{\gamma i_1(ij)}^*(Z_{(ij)}) \leq N_{h(ij)}^*, h \in f_{(ij)}, l_{(ij)} \in L; \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} [x_{\gamma h i_1(ij)}^*(Z_{(ij)})] &= x_{\gamma h i_1(ij)}^*(Z_{(ij)}), \\ \gamma \in E^f, h \in f_{(ij)}, i_1 &= 1, 2, \dots, M_{(ij)}^*, l_{(ij)} \in Q; \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{(ij) \in H} \sum_{\gamma=1}^{x_{\gamma h(ij)} - N_{\gamma h(ij)}} x_{\gamma h \rho(ij)}^{\text{CH}}(Z_{(ij)}) t_{\gamma h \rho(ij)}^{\text{CH}} &= \\ = \sum_{(ij) \in Q} \sum_{g=1}^{N_{\gamma h(ij)}^* - x_{\gamma h(ij)}} x_{\gamma h \rho(ij)}^{\text{HA3}}(Z_{(ij)}) t_{\gamma h \rho(ij)}^{\text{HA3}}, & \\ \gamma \in E^f, h \in f_{(ij)}; & \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{l_{(ij)}=1}^L \sum_{Q_{(ij)c}} \delta_g \delta_{(ij)hr} \frac{t_{(ij)hrg}}{t_{(ij)gd.п}} \leq V_h, h \in f_{(ij)}. \quad (7)$$

Здесь  $x_{(ij)}^{\text{CH}}(Z_{(ij)})$  — число снятых исполнителей за время  $t_{(ij)}^{\text{CH}}$  с  $l_{(ij)}$ -й операции, а  $x_{(ij)}^{\text{HA3}}(Z_{(ij)})$  — число назначенных исполнителей за время  $t_{(ij)}^{\text{HA3}}$  на выполнение  $l_{(ij)}$ -й операции соответственно на  $\rho$ -й итерации решения задачи,  $(i, j) \in L$ ;  $Q_{(ij)c}$  — состав инструмента на  $l_{(ij)}$ -й операции;  $V_h$  — суммарный объем имеющегося инструмента;

$$\delta_g = \begin{cases} 1, & \text{если } g \in Q_{(ij)c}, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Смысл выражения (1) состоит в том, что суммируются разности  $T_{\mu}^{\text{дир}}$  и  $T_{\mu}^{\text{кр}}$  по всем целевым событиям, при этом суммарный объем выполненных операций за любой интервал времени должен быть максимальным. Для начала любой операции необходимо, чтобы к данному моменту времени были выполнены технологические условия, а также свободны ресурсы. Условие (2) означает, что планируемое время выполнения операции  $t_{\gamma(ij)}$  находится в пределах значений, соответствующих минимальному  $t_{\gamma(ij)}^{\min}$  и максимальному  $t_{\gamma(ij)}^{\max}$  возможному времени ее выполнения, а условие (4) — число перераспределяемых специалистов  $x_{h, i_1(ij)}^*(Z_{(ij)})$  находится в пределах, соответствующих их мини-

мальному  $N_{h(ij)}$  и максимальному  $N_{h(ij)}^*$  числу. В соответствии с условием (3) сумма продолжительностей новых времен детализированной  $l_{(ij)}$ -й операции  $t_{\gamma i_1(ij)}^*$  должна также находиться в соответствующих пределах, т. е. не превышать минимально возможного времени выполнения  $l_{(ij)}$ -й операции  $t_{\gamma(ij)}^{\min}$  и ее планируемого времени выполнения  $t_{\gamma(ij)}$  как до перераспределения специалистов, так и после. Согласно условию (5) специалисты назначаются целыми единицами. Смысл балансового условия (6) заключается в том, что суммарное время снятия специалистов  $t_{(ij)}^{\text{CH}}$  должно совпадать с суммарным временем их назначения  $t_{(ij)}^{\text{HA3}}$  на другие операции одного сетевого графа. Ограничение (7) учитывает тот факт, что инструментальный комплект, предназначенный для  $h$ -го типа специалиста, не должен превышать суммарный объем имеющегося инструмента.

При выполнении проекта необходимо получить такой рациональный план распределения ресурсов  $\Omega^*$  при фиксированном числе специалистов  $x$  и их различных типов  $h$ , который позволит при ограничениях (2)–(7) минимизировать время его выполнения  $T$  [7]:

$$[\Omega^*]: T[\Omega^*]_{x, h} = \min_{\substack{\Omega \in Y \\ x \in X}} T[\Omega]_{x, h}, \quad T < T^{\text{дир}}. \quad (8)$$

Для решения задачи применяется метод последовательных назначений совместно с процедурой типа динамического программирования, согласно которой состояние системы изменяется в соответствии с одношаговой функцией переходов.

## 2. МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ НАЗНАЧЕНИЙ

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов предлагается применить метод последовательного назначения, сущность которого заключается в распределении по  $n_1$  объектам использования  $m^*$  типов средств, причем  $i_2$ -й тип содержит  $b_{i_2}$  единиц средств и назначении их по одному из множества вариантов  $Y$  последовательностей  $\{a_{k_1}^{(y)}\}$ ,  $y = 1, 2, \dots, Y, k_1 = 1, 2, \dots, \gamma^{\text{об}}$ . Причем каждый последующий номер средств  $i_3$  и номер объекта  $j_2$  для назначения определяется из выражения:

$$\max_{j_1} \max_{i_2: \sum_{j_1} u_{i_2 j_1} \leq b_{i_2}} \Delta_{i_2} f_{j_1}^{\text{об}} = \Delta_{i_3} f_{j_2}^{\text{об}}, \quad (9)$$

где

$$\Delta_{i_2} f_{j_1}^{\text{об}} = f_{j_1}^{\text{об}}(u_{1,j_1}, \dots, u_{i_2-1,j_1}, u_{i_2,j_1} + 1, \dots, u_{m^*,j_1}) - f_{j_1}^{\text{об}}(u_{1,j_1}, \dots, u_{i_2-1,j_1}, u_{i_2,j_1}, \dots, u_{m^*,j_1}) \quad (10)$$

— приращение прибыли при назначении одной единицы средств.

При использовании средств на  $j_1$ -м объекте прибыль определяется как

$$M^{\text{об}} = \sum_{j_1=1}^{n_1} f_{j_1}^{\text{об}}(u_{1,j_1}, u_{2,j_1}, \dots, u_{i_2,j_1}, \dots, u_{m^*,j_1}), \\ i_2 = 1, 2, \dots, m^*, \quad j_1 = 1, 2, \dots, n_1, \quad (11)$$

где  $u_{i_2,j_1} \geq 0$  — целое число единиц  $i_2$ -го типа, выделенных на  $j_1$ -й объект.

Величина  $u_{i_2,j_1}$  задается в виде матрицы и является рациональным целочисленным планом распределения.

Однако при назначении средств только по одному варианту последовательности номеров типов средств существующий метод дает значительную погрешность и не учитывает возможности перераспределения специалистов с учетом их взаимозаменяемости, классности и обеспеченности инструментом.

Для решения задачи перераспределения ресурсов предлагается процедура совместного применения метода последовательного назначения и алгоритма направленного перебора. Для возможности реализации метода функции суммарной прибыли должны быть возрастающими и выпуклыми, а назначение на операции производиться последовательно по одной единице.

Максимальное приращение целевой функции  $\tilde{\Delta}_{i_2}$  определяется как разность увеличения  $\Delta_{i_2}^{(+)} f_{j_1}^{\text{об}}$  или уменьшения  $\Delta_{i_2}^{(-)} f_{j_1}^{\text{об}}$  функции (11) при перераспределении ресурсов  $i_2$ -го типа на  $j_1$ -й объект. Тогда выделенные средства будут распределены по объектам использования целыми единицами и суммарная прибыль (11) будет максимальной.

Модернизация метода последовательных назначений осуществляется так, что каждое значение плана распределения ресурсов делится на  $\mu^{\text{об}}$  целых частей, где  $\mu^{\text{об}} > 0$ . Эти части принимаются за новые единицы и рассчитывается новый план распределения выделенных ресурсов, который будет оптимальным с точностью до нескольких единиц плана. Расчет выполняется последовательно и повторяется до тех пор, пока значение приращения функции (11) не станет отрицательным. Затем каждое значение полученного плана умножа-

ется на  $(1/\mu^{\text{об}})$ , который в результате будет оптимальным.

Такой подход позволяет получить численное решение заданной степени точности, если переназначение специалистов каждого типа с одной критической операции на другую операцию производится по одной единице. На его основе разработан алгоритм оптимального распределения ограниченных организационно-технических ресурсов по зависимым операциям [7, 8].

### 3. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ

Предложенный алгоритм реализован при разработке СУРРР для решения прикладной задачи [8]. Для получения рационального плана распределения ограниченных организационно-технических ресурсов в динамически меняющейся обстановке очень важна возможность контроля и регулирования единой системы управления методами сетевого планирования и управления. Под СУРРР будем понимать систему управления проектами, ограниченную по времени организационными и техническими ресурсами. Параметры такой СУРРР должны иметь тот же смысл, что и параметры управления без учета ресурсов. В основу обоснования создания СУРРР положено следующее

**Утверждение.** Для того чтобы в СУРРР параметры имели тот же смысл, что и в системе управления без учета ресурсов, необходимо и достаточно между операциями сетевой модели установить кроме технологических связей, связи по ресурсам. ♦

**Доказательство.** Справедливость утверждения достаточно доказать для главного параметра системы — критического пути при постоянном качестве выполнения операций. Критическим называется путь, ведущий от множества входных операций к множеству выходных операций и состоящий из критических операций [4]. Операция называется критической, если ее резерв равен нулю [5].

**Необходимость.** Пусть в СУРРР критический путь имеет то же толкование, что и в системе управления без учета ресурсов. Предположим противное: связи по ресурсам между операциями в СУРРР не установлены. В случае дефицита ресурсов суммарная продолжительность выполнения операций, которые обеспечиваются одними и теми же специалистами, будет больше критического пути, определенного только на основе технологических связей между операциями сетевой модели. Тогда критический путь не определит срок окончания всего проекта, что противоречит утверждению.

**Достаточность.** Поскольку критический путь в СУРРР определен как самый длинный путь на всем множестве путей, образуемых технологией и распределением специалистов, обеспечивающих выполнение проекта, то очевидно, что параметры СУРРР будут иметь тот же смысл, что и параметры системы управления без учета ресурсов. ♦



Из утверждения следует основное правило построения сетевой модели в СУРРР: в сетевой модели дуги графа ориентируются в соответствии с технологией процесса и распределением организационно-технических ресурсов, обеспечивающих его выполнение. Посредством СУРРР решаются задачи:

получения рационального плана распределения организационно-технических ресурсов;

минимизации временных затрат на выполнение всего проекта;

перераспределения организационно-технических ресурсов путем минимизации полных резервов времени операций.

Последняя из них сводится к задаче невыпуклого целочисленного программирования с целевой функцией, численное значение которой зависит от структуры сетевой модели.

Рассматриваемая СУРРР предназначена учитывать входящие и исходящие организационно-технические ресурсы, планировать процесс их распределения, управлять им и контролировать его, а также выполнять поставленные задачи за минимальное время с заданной степенью точности. Для этого в системе предусмотрены средства сравнения плановых показателей с фактическими. При несовпадении фактических показателей с плановыми учитывается их разница при очередном цикле функционирования системы.

Разработанная СУРРР (рис. 1) отличается дополнительно введенными на начальный момент времени  $T_1$  устройством 4, ячейками 5, 11, 12, 14–17, а на конечный момент времени  $T_2$  — блоком 24, ячейками 18, 19, 25 и 26 [10]. В основу функционирования СУРРР положена методика освоенного объема [11].

На вход 1 блока 1 поступает исходная информация о наличии материальных и организационно-технических ресурсов и воздействиях внешней среды, а количество освободившихся ресурсов в ходе выполнения проекта вводится оператором по входу 2 и 3 блока 2 соответственно. При этом в блоке 2 обратные связи с блоком 1 осуществляются по трем отдельным направлениям. Первое направление относится к организации обратных связей по назначению освободившихся ресурсов на новые операции проекта, второе — к выполнению операций, третье — к оптимальному перераспределению ресурсов посредством блока 24, в котором реализован модернизированный метод последовательных назначений. Взаимосвязь направлений на начальный и конечный моменты времени  $T_1$  и  $T_2$  осуществляется посредством организации функциональных связей между ячейками блока 2 и блока 1. В блоке 24 учитывается доступное количество ресурсов в системе, контролируется ход выполнения операций, рассчитываются парамет-

ры сетевой модели, и формируется оптимальный план распределения ресурсов.

Принимая объем  $l_{(ij)}$ -й операции равным  $C_{(ij)} = \sum_{i_1=1}^{M_{(ij)}^*} C_{i_1(ij)}^* = 1, i_1 = 1, 2, \dots, M_{(ij)}^*, h \in f_{(ij)}$ , при пос-

тоянном уровне ресурсов в проекте и вычисляя плановую интенсивность использования ресурсов  $k_{(ij)}$  из соотношений для планового времени выполнения операций из модели [11]  $T_{(ij)} = W_{(ij)}/k_{(ij)}x_{(ij)}$  и целевой функции (1)  $t_{(ij)} = C_{(ij)}/\lambda_{(ij)}x_{(ij)}(Z_{(ij)})E_{(ij)}$ , обобщенная модель СУРРР аналогично работе [11] будет имеет вид:

$$\begin{cases} s_{(ij)}(t) = x_{(ij)}(Z)t, \\ \omega_{(ij)}(t) = x_{(ij)}(Z_{(ij)})\lambda_{(ij)}E_{(ij)}t, \\ t_{(ij)} = \frac{C_{(ij)}}{\lambda_{(ij)}x_{(ij)}(Z_{(ij)})E_{(ij)}}, \\ S = \frac{C_{(ij)}}{\lambda_{(ij)}E_{(ij)}}. \end{cases} \quad (12)$$

Плановые значения показателей эффективности выполнения операций и использования средств определяются из выражения [8]

$$\begin{cases} e_{(ij)} = C_{(ij)}/S_{(ij)}, \\ e_{(ij)}(t) = x_{(ij)}(Z)/s_{(ij)}(t), \end{cases} \quad (13)$$

где  $t$  — текущий момент времени;  $s_{(ij)}(t)$  и  $\omega_{(ij)}(t)$  — планируемая динамика затрат и объема на  $l_{(ij)}$ -й операции соответственно;  $x_{(ij)}(Z)$  — планируемое число специалистов на  $l_{(ij)}$ -й операции;  $t_{(ij)}$  — планируемое время  $l_{(ij)}$ -й операции;  $W_{(ij)}$  — плановый объем  $l_{(ij)}$ -й операции;  $S$  и  $S_{(ij)}$  — фактические и планируемые суммарные затраты на выполнение  $l_{(ij)}$ -й операции соответственно;  $\lambda_{(ij)}$  — плановая производительность специалиста,  $E_{(ij)}$  — запланированный объем инструмента, необходимого для реализации проекта,  $e_{(ij)}$  и  $e_{(ij)}(t)$  — плановая эффективность выполнения  $l_{(ij)}$ -й операции и плановая эффективность использования средств на момент времени  $t$  соответственно.

С помощью модели (12) и соотношения показателей эффективности (13) можно до начала реализации проекта решать следующие задачи планирования: определение интенсивностей или количества организационно-технических ресурсов, позволяющих выполнить проект за заданное время; определение времени выполнения проекта при заданных ограничениях на интенсивности и ресурсы и др., оценка упущенной выгоды, штрафов и прочих санкций за перерасход средств и задержки в достижении конечной цели проекта. Отме-

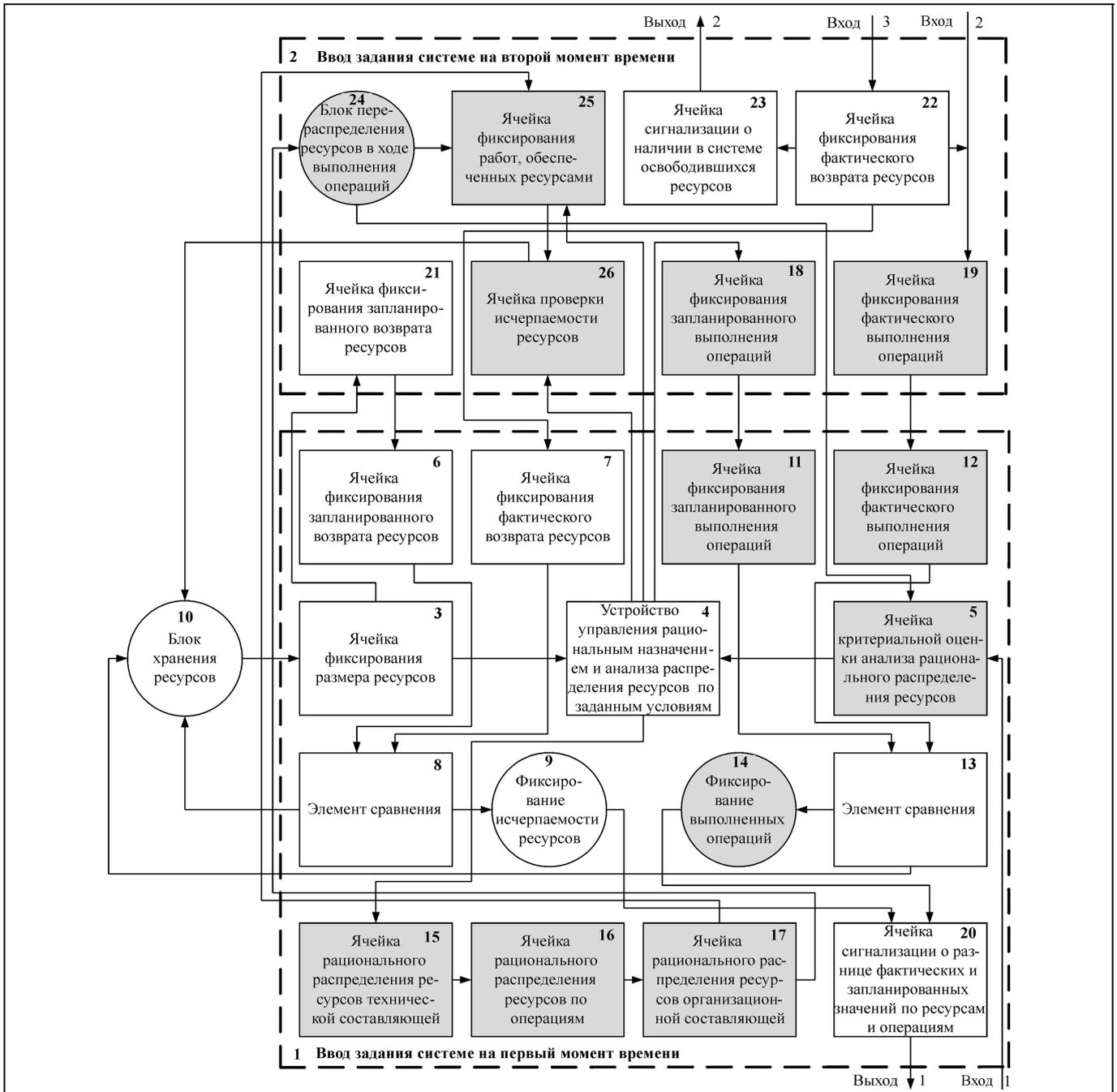


Рис. 1. Структура системы управления рациональным распределением ресурсов

тим, что в рамках рассматриваемой модели минимизировать суммарные затраты нельзя, так как они не зависят от интенсивностей и динамики потребления ресурса [11].

При воздействии на систему внешних и внутренних возмущающих факторов появляется необходимость в управляющих воздействиях и контроле хода выполнения проекта. Для этого необходимо фиксировать точки контроля через определенные промежутки времени [2].

В работе [7] приведен пример решения задачи оптимального распределения ресурсов по зависимым операциям с помощью модернизированного метода последовательных назначений, а также подробно рассмотрены основные этапы решения задачи при перераспределении ресурсов. В работе [12] представлена разработка алгоритмического обеспечения СУРРР в организационно-технических системах (ОТС) по множеству зависимых операций. Разработанные алгоритмы имеют вид за-

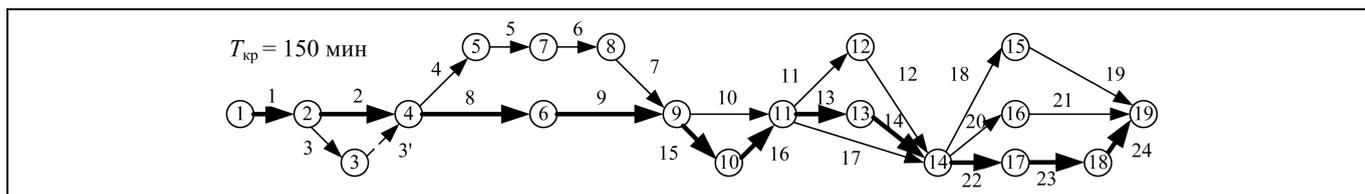


Рис. 2. Исходная сетевая модель развертывания радиолокационной станции

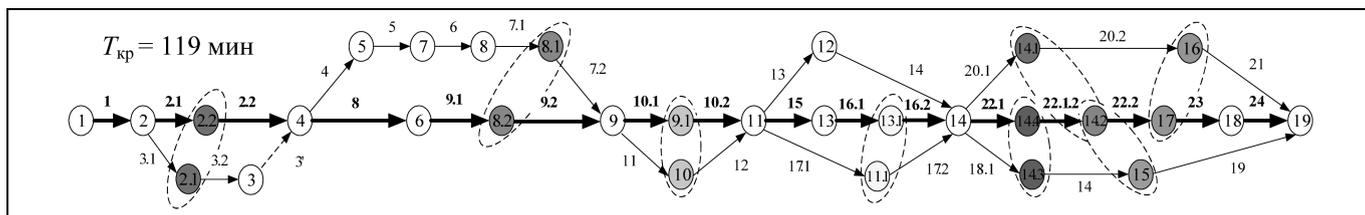


Рис. 3. Полученная сетевая модель развертывания радиолокационной станции

конченных программных продуктов и применяются в процессе функционирования СУРРР [8, 12].

#### 4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Пусть требуется развернуть радиолокационную станцию экипажем из восьми специалистов за минимальное время.

Условно разбив данный проект на операции, необходимо оптимально распределить ресурсы при заданном директивном времени. Исходные данные (время выполнения операций, план распределения специалистов 2-го и 3-го классов и полные положительные резервы времени операций) пред-

ставлены в табл. 1. Технология проектирования и принятый порядок выполнения операций представлены на рис. 2. Требуется определить оптимальную структуру сетевой модели, оптимальный план распределения специалистов, а также минимальное время выполнения проекта.

В результате решения задачи с помощью предложенного модернизированного метода последовательных назначений и алгоритма [7] получим оптимальную по структуре сетевую модель, представленную на рис. 3 и табл. 2 (с новым, оптимальным, планом распределения специалистов и минимальными полными положительными резервами времени операций).

Анализ показал, что критический путь сократится на 31 мин. Этим временем можно варьиро-

Таблица 1

Исходный план распределения ресурсов

Операция	1	2	3	3'	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$t_{(ij)}$	5	12	5	0	10	24	10	14	40	22	13	10	5	8	15	18	8	22	11	6	8	10	18	10	2
$x_{(ij)3}$	6	3	3	3	4	4	4	4	2	2	3	3	3	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
$x_{(ij)2}$	2	1	1	1	0	0	0	0	2	2	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
$\Delta^*_{(ij)}$	0	0	7	7	4	4	4	4	0	0	2	0	0	3	3	0	0	4	13	13	12	12	0	0	0

Таблица 2

Оптимальный план распределения ресурсов

Операция	1	2.1	2.2	3.1	3.2	3	...	9.1	9.2	10.1	10.2	11	12	13	14	15	16.1	16.2	17.1	17.2	18.1	18.2	19	20.1	20.2	21	22.1.1	22.2.2	22.2	23	24
$t_{(ij)}$	5	1,5	3,2	1,5	3,1	0	...	6,5	9	6	4	6	4	8	12	15	1	4,6	16	4,5	4	14	5	5	7,6	10	4	2,7	4,3	10	2
$x_{(ij)3}$	6	3	4	3	2	0	...	2	5	3	3	3	3	3	3	1	1	2	2	1	2	1	2	2	0	2	2	3	4	2	2
$x_{(ij)2}$	2	1	2	1	0	0	...	2	0	1	0	1	2	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta^*_{(ij)}$	0	0	0	0,1	0,1	-	...	0	0	0	0	0	0	0,6	0,6	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0,4	0,4	0,4	0	0	0	0	0

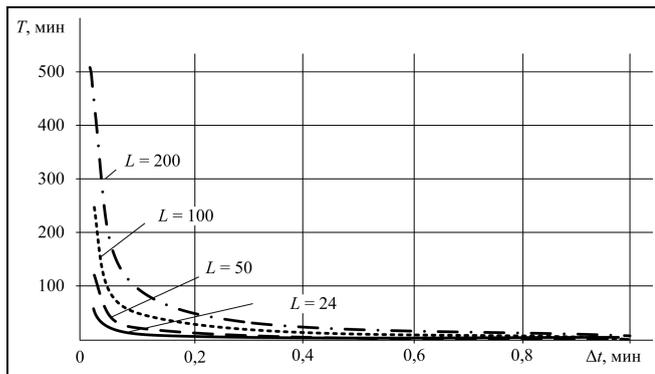


Рис. 4. Вычислительные затраты на ЭВМ в зависимости от числа операций

вать и определять директивные сроки выполнения проекта. Расчеты показывают, что резервы времени сокращаются с 92 до 4 мин, а экономия затрат составит 4,16 чел. · ч. Производительность специалистов увеличивается, а трудоемкость операций обратно пропорционально уменьшается. Внедрение модернизированного метода последовательных назначений вызовет эффект, связанный с уменьшением на 20,8 % временных затрат на развертывание, что подтверждено результатами экспериментальных исследований.

Общее время вычислительного процесса может быть определено по формуле

$$T = t_1 n_{\text{пер}} = K_1 K_2 t_{(ij)} L / \Delta t, \quad (14)$$

где  $t_1$  — время определения оптимального варианта перераспределения специалистов в пределах двух соседних узлов,  $n_{\text{пер}}$  — число перераспределений,  $K_1$  — коэффициент производительности ЭВМ (0,5–0,7),  $K_2$  — коэффициент запараллеленности операций сетевой модели (0,2–0,4),  $\Delta t$  — интервал деления операций (чем меньше  $\Delta t$ , тем выше точность получения оптимального решения задачи).

На рис. 4 приведен график вычислительных затрат на ЭВМ.

Анализ графика показывает, что для сетевых моделей с небольшим числом операций интервал  $\Delta t$  следует выбирать не больше 0,2 мин, а при большом числе операций — более, чем 0,4 мин, поскольку при меньших значениях  $\Delta t$  вычислительное время начинает возрастать в разы, тогда как снижение резервов времени будет составлять единицы процентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дано решение задачи рационального распределения ограниченных ресурсов по зависимым операциям в организационно-технических системах с помощью модернизированного метода последова-

тельных назначений. Предложена структура системы, позволяющая осуществлять планирование, управление и контроль выполнения проекта. Изложенный подход распределения ресурсов может быть применен для оперативного развертывания и подготовки к функционированию сложных технических систем, ремонта, технического обслуживания, транспортирования и решения других задач управления в организационно-технических системах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зырянов Ю.Т., Малыков К.А. Управление профилактикой в организационно-технических системах. — М.: АСТ-Пресс книга, 2005. — 160 с.
2. Зырянов Ю.Т., Коновалов О.А. Алгоритм решения задачи распределения ресурсов в организационно-технической системе // Всерос. науч.-практ. конф. «Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения. Системы управления, связи и навигации» / ВАИУ, г. Воронеж. — Воронеж, 2009. — Ч. 9. — С. 78–83.
3. Костина Л.П. Постановка проблемы оптимального распределения ресурсов на стохастических сетях со сложной пространственно-временной структурой // Вестник Санкт-Петербургского университета. — 1992. — Сер. 1, вып. 2 (8). — С. 15–19.
4. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М. Методы агрегирования в управлении проектами. — М.: ИПУ РАН, 1999. — 55 с.
5. Бурков В.Н., Ланда Б.Д., Ловецкий С.Е. Сетевые модели и задачи управления. — М.: Советское радио, 1967. — 144 с.
6. Горнев В.Ф., Емельянов В.В., Овсянников М.В. Оперативное управление в ГПС. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.
7. Зырянов Ю.Т., Коновалов О.А. Алгоритм распределения ресурсов по множеству зависимых операций // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2009. — № 10. — С. 10–16.
8. Свид. 2007612327 РФ. Распределение ограниченных ресурсов организационно-технической системы военного назначения по множеству зависимых операций (программа для ЭВМ) / Ю.Т. Зырянов, С.Е. Сухоруков, О.А. Коновалов // Зарег. в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 4.06.07.
9. Бурков В.Н., Моисеенко Г.Е. Вопросы анализа и оптимизации комплексов операций при учете перемещений ресурсов // Автоматика и телемеханика. — 1969. — № 12. — С. 86–93.
10. Пат. 2375750 РФ. Система рационального распределения ресурсов / О.А. Коновалов, Ю.Т. Зырянов, К.А. Малыков // Бюл. — 2009. — № 34. — 15 с.
11. Колосова Е.В., Новиков Д.А., Цветков А.В. Методика освоения объема в оперативном управлении проектами. — М.: ООО «НИИЦ «Апостроф»», 2000. — 156 с.
12. Свид. 2009611379 РФ. Алгоритмическое обеспечение системы управления распределением ресурсов в организационно-технической системе по зависимым операциям с переменной интенсивностью выполнения работ (программа для ЭВМ) / О.А. Коновалов, Ю.Т. Зырянов // Зарег. в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 22.05.09.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

**Зырянов Юрий Трифионович** — д-р техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, ✉ Zut-tmb@mail.ru,

**Коновалов Олег Анатольевич** — адъюнкт, Военный авиационный инженерный университет, г. Воронеж, ✉ Oleg-070707@yandex.ru,

**Малыков Александр Константинович** — адъюнкт, 13 ГНИИ МО РФ, г. Люберцы.