AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 625-1, 51-7, 519.614.2

В.А. Бабошин, А.К. Черных, М.Г. Яшин, К.Н. Савинов

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИМИЗАЦИИ В ПЛАНЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРИКРЫТИЯ ОБЪЕКТОВ НА КОММУНИКАЦИЯХ

Бабошин Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, окончил Ульяновское высшее военное командное училище связи им. Г.К. Орджоникидзе. Доцент кафедры «Восстановление устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах» Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения (ВА МТО) им. ген. армии А.В. Хрулёва. Имеет статьи, изобретения в областях анализа (синтеза) информационных систем и математического моделирования, восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. [e-mail: boboberst@mail.ru].

Черных Андрей Климентьевич, доктор технических наук, доцент, окончил Ленинградский государственный университет им. А.А. Жданова, профессор кафедры «Информатика и математика» Санкт-Петербургского Военного института войск национальной гвардии Российской Федерации. Имеет статьи, изобретения в областях анализа (синтеза) информационных систем и математического моделирования, управления организационными системами. [e-mail: nataliachernykh@mail.ru].

Яшин Михаил Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, окончил Санкт-Петербургский Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений). Доцент кафедры «Восстановление устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах» Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва. Имеет статьи, изобретения в областях анализа (синтеза) информационных систем и математического моделирования, восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. [e-mail: mikl771@rambler.ru].

Савинов Константин Николаевич, кандидат военных наук, доцент, окончил Военную академию тыла и транспорта им. ген. армии А.В. Хрулёва. Начальник кафедры «Восстановление устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах» Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) ВА МТО им. ген. армии А.В. Хрулёва. Имеет статьи, монографии, научно-исследовательские работы в областях технического прикрытия железных дорог, восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. [e-mail: savinoff@mail.ru].

Аннотация

Предложен метод решения задачи распределения ограниченного целочисленного ресурса сил и средств транспортного обеспечения по объектам технического прикрытия. Обоснована перспективность разработки специального математического обеспечения с целью повышения качества управления на основе автоматизации процессов содержательной обработки информации и поддержки принятия решений. Новизна метода определяется постановкой указанной задачи в виде модели целочисленного программирования. Метод характеризуется устойчивостью

вычислительной схемы к изменению размерности задачи, небольшим количеством проводимых итераций и его быстрой сходимостью к оптимальному решению, что определяет его эффективность.

Ключевые слова: транспортное обеспечение, распределение, объект технического прикрытия, алгоритм решения задачи распределения, математические методы, программное обеспечение.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-3-61-4-12

OPTIMIZATION ELEMENTS IN THE PLAN OF TECHNICAL COVERING OF OBJECTS IN COMMUNICATION LINES

Vladimir Aleksandrovich Baboshin, Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from the Ulyanovsk Higher Military Command School of Communications; Associate Professor of the Department of Reconstruction of Automatic, Telemechanic, and Communication Devices on Railways at the Military Institute of Railway Troops and Military Communications of the Military Academy of Logistics and Transport n.a. Army General A.V. Khrul'jov; an author of articles, inventions in the field of analysis (synthesis) of information systems and mathematical modeling, reconstruction of railway automatic and telemechanic devices. e-mail: boboberst@mail.ru.

Andrei Klimentevich Chernykh, Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from Leningrad State University n.a. A.A. Zhdanov; Professor of the Department of Informatics and Mathematics at the St. Petersburg Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation; an author of articles, inventions in the field of analysis (synthesis) of information systems and mathematical modeling, organization system control. e-mail: nataliachernykh@mail.ru.

Mikhail Gennadievich Iashin, Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from the St. Petersburg Military Institute of Railway Troops and Military Communications; Associate Professor of the Department of Reconstruction of Automation, Telemechanic and Communication Devices on Railways at the Military Institute of Railway Troops and Military Communications of the Military Academy of Logistics and Transport n.a. Army General A.V. Khrul'jov; an author of articles, inventions in the field of analysis (synthesis) of information systems and mathematical modeling, reconstruction of railway automation and telemechanic devices. e-mail: mikl771@rambler.ru.

Konstantin Nikolaevich Savinov, Candidate of Military Sciences, Associate Professor; graduated from the Military Academy of Logistics and Transport n.a. Army General A.V. Khrul'jov; Head of the Department of Reconstruction of Automation, Telemechanic and Communication Devices on Railways at the Military Institute of Railway Troops and Military Communications of the Military Academy of Logistics and Transport n.a. Army General A.V. Khrul'jov; an author of articles, monographs, scientific research papers in the field of the technical and engineering coverage of railways, the reconstruction of railway automation and telemechanic devices. e-mail: savinoff@mail.ru.

Abstract

A method is proposed for solving the problem of distributing a limited integer resource of forces and means of transport support for technical cover facilities. The prospects of developing special mathematical software with the aim of improving the quality of management based on the automation of the processes of meaningful processing of information and decision support are justified. The novelty of the method is determined by the statement of the indicated problem in the form of an integer programming model. The method is characterized by the stability of the computational scheme to change the dimension of the problem, a small number of iterations and its rapid convergence to the optimal solution, which determines its effectiveness.

Key words: transport support, distribution, technical cover, algorithm for solving the distribution problem, mathematical methods, software.

ВВЕДЕНИЕ

При широком использовании в управлении войсками и силами автоматизированных систем управления

(АСУ) возникают новые подходы к решению «классических», с точки зрения предметной области, задач, связанные в первую очередь с резко возросшими воз-

возможностями вычислительной техники. При этом в рамках функционирования АСУ возможно как получение, ранее недоступных, оптимальных решений, так и существенное уменьшение продолжительности решения подобных задач. Фактически, такие решения могут быть сведены к распределительной задаче по формированию рационального контура управления и организации процесса принятия решения и доведения его до исполнителей.

Процесс формирования контуров управления в иерархической АСУ в работе [1] организован путём решения трёхмерной задачи оптимального распределения объектов управления (ОУ), средств наблюдения (СН) и объектов среды (ОС), объединённых в контуры управления, на основе метода аналитической аппроксимации алгоритма распределения с использованием ортогонального преобразования.

В работе [2] рассматриваются основные методы подготовки принятия информационных решений:

- метод сопоставления данных (корреляционный метод);

- метод фильтрации данных;

- метод распознавания ситуаций.

Метод сопоставления данных включает: группирование данных от различных источников информации; определение веса сообщений; объединение однотипных данных; выработку порога; сравнение с порогом; принятие решения.

Метод фильтрации содержит следующие этапы: анализ данных по параметрам фильтра, выявление подтверждений, определение весовых коэффициентов, объединение данных, сравнение с пороговым значением, принятие решения.

Процедура распознавания содержит следующие этапы: выделение информации о ситуации (т. е. данные обстановки и процесса её развития) из общего потока информации, анализ этой информации, разделение её на части, относящиеся к различным признакам обстановки и процесса как такового, определение существенных признаков на основании полученной информации, прогнозирование, определение возможных последствий, определение степени достоверности прогноза и сопоставление его с исходной информацией, устранение противоречий, сопоставление описания ситуации в целом, принятие решения.

Предлагаемые в [2] математические модели отражают принципиальное различие между системами массового обслуживания (СМО) информационно-расчетных задач и СМО поддержки принятия решений (ППР). СМО ППР является основным средством повышения интеллектуальных возможностей человека, осуществляющего управление, так как оно позволяет объединить достижения современной науки с опытом, знаниями и интуицией руководителя.

К числу вышеупомянутых «классических» задач относится формирование фрагментов расчетной части плана технического прикрытия (ТП) объектов транспортной сети, которая в терминах теории исследования операций, является типичной задачей распределения

ограниченного ресурса сил и средств транспортного обеспечения по объектам ТП. Данная задача может быть решена в соответствии с технологией, предлагаемой в [1] на основе нелинейного целочисленного программирования.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ТП ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Восстановление железных дорог – это комплекс организационных, инженерных и технических мероприятий и работ, проводимых на разрушенных объектах железнодорожной транспортной сети и различных сооружениях для возобновления прерванного движения поездов на направлениях перевозок. Задача распределения сил и средств транспортного обеспечения для ТП подобных объектов относится к классу сетевых задач оптимального распределения ограниченных ресурсов [3–6].

Например, восстановление нормального функционирования станции, как отдельного пункта железнодорожной транспортной сети, – сложный организационно-технологический комплекс работ, виды и объём которых зависят от категории станции, полученных разрушений и технических требований к её восстановлению. Такой подход применительно к решению задачи восстановления технических средств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи рассматривался в [7].

Как правило, задачи этого класса формулируются в виде следующих моделей: сетевого планирования и управления, линейного, целочисленного и нелинейного программирования, каждая из которых имеет точное решение [5]. Однако большая размерность таких моделей и возможность использования для их решения в настоящее время методов, обладающих экспоненциальной трудоёмкостью (метод ветвей и границ, метод динамического программирования и т. п.), не позволяют в пределах ограниченных временных рамок, характерных для оперативных математических моделей, получить искомое точное решение в приемлемые сроки. Последнее обстоятельство приводит во многих случаях к необходимости упрощения данной задачи путем изменения целевой функции, состава и характера её ограничений.

Свободным от указанных недостатков является подход к решению этой задачи, предлагаемый в данной статье. Сущность его заключается в определении рационального, с точки зрения выполнения требуемого объёма работ, варианта расстановки сил и средств транспортного обеспечения по объектам ТП указанного вида на заданных коммуникациях в установленные сроки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача нахождения рационального варианта расстановки сил и средств транспортного обеспечения формулируется в виде задачи нелинейного целочисленного программирования для объектов ТП, O_{kj} – k -й объект ТП j -й коммуникации:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in M_j} C_{rkj} \frac{P_{rkj}}{X_{rkj}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in M_j} X_{rkj} = N_r \quad \text{для } \forall r, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in M_j} P_{rkj} \geq N_r \quad \text{для } \forall r, \quad (3)$$

$$0 < X_{rkj} \leq P_{rkj} \quad \text{для } \forall k, r, j, \quad (4)$$

$$X_{rkj} - \text{целое число} \quad \text{для } \forall k, r, j, \quad (5)$$

где J – множество коммуникаций;

M_j – множество объектов ТП j -й коммуникации;

C_{rkj} – приоритет O_{kj} по r -му виду восстановительных работ, число;

P_{rkj} – фронт r -го вида восстановительных работ на O_{kj} единиц;

X_{rkj} – наряд восстановительных формирований (ВФ) (специализированных частей и спецформирований ведомств) r -го вида, выделяемых на O_{kj} единиц;

N_r – ресурс ВФ r -го вида, единиц.

Отметим, что предлагаемый ниже подход к решению задачи (1)–(5) успешно апробирован при решении ряда прикладных задач в интересах МЧС, МВД, а также в некоторых экономических задачах [8–10].

Дадим краткую содержательную характеристику задачи (1)–(5).

Целевая функция (1) минимизирует «недопоставку» ВФ на объекты ТП с учетом их приоритетов.

Ограничение (2) свидетельствует о том, что имеющийся в наличии ресурс ВФ должен полностью распределяться между объектами ТП.

Ограничение (3) фиксирует факт ограниченности ресурсов, имеющихся в наличии ВФ.

Ограничение (4) показывает, что наряды ВФ, выделяемые на объекты, не могут превышать фронты восстановительных работ на объектах.

Наличие указанных ограничений позволило осуществить учёт специфики конкретной задачи (1)–(5) и разработать эффективный, прежде всего с точки зрения продолжительности расчетов на ПЭВМ, численный метод её решения.

Сущность предлагаемого метода заключается в регуляризации исходной целочисленной задачи (т. е. во временном отбрасывании условия целочисленности её переменных), нахождении решения соответствующего нецелочисленного аналога и использовании его в дальнейшем для получения рационального решения рассматриваемой задачи. В свою очередь, решение нецелочисленной задачи (1)–(4) также находится путём временного отбрасывания ограничительного условия (4), отыскания с помощью метода множителей Лагранжа решения задачи (1)–(3) и проверки его затем на

удовлетворение всем принятым ограничениям исходной задачи выпуклого программирования (1)–(5).

Тогда алгоритм решения задачи (1)–(5) имеет вид.

Шаг 1. Рассматривается задача вида:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i a_i}{x_i} \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = G.$$

При этом G – целочисленное число, означающее ресурс определённого вида, c_i – приоритет объекта, a_i – объём фронта работ на объекте.

Компоненты вектора-решения $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ этой задачи определяются следующим образом:

$$x_i^* = \frac{G \sqrt{c_i a_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{c_j a_j}}. \quad (6)$$

Шаг 2. Проверка выполнимости ограничительных условий для компонент найденного решения: $0 < x_i^* \leq a_i$, $i = \overline{1, n}$. Если все компоненты удовлетворяют требуемым ограничениям, то решение задачи (1)–(4) получено и осуществляется переход на шаг 4. В противном случае – переход на шаг 3.

Шаг 3. Значения тех x_i^* , которые удовлетворяют условию $x_i^* > a_i$ полагаем равными a_i и рассматриваем следующую задачу:

$$\sum_{i \in M} \frac{c_i a_i}{x_i} \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i \in M} x_i = G - \sum_{i \notin M} a_i,$$

где $M = \{i : i = 1, 2, \dots, n, x_i^* \leq a_i\}$.

В соответствии с (6) находим решение этой задачи и переходим на шаг 2.

Шаг 4. Если все компоненты вектора-решения задачи (1)–(4) – X^* являются целочисленными, то решение исходной задачи (1) – (5) найдено и осуществляется переход на шаг 7. В противном случае переходим на шаг 5.

Шаг 5. Если в векторе X^* отсутствуют целочисленные компоненты, то переходим на шаг 6. Если же у вектора X^* m ($m < n$) целочисленных компонент, то отсекаем их и, перенумеровав оставшиеся нецелочисленные компоненты, получаем новый вектор $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, где $n := n - m$.

Значение G в ограничениях задачи (1)–(5) корректируем следующим образом:

$$G := G - \sum_{j \in J} x_j^*, \text{ где } J = \{j : x_j^* - \text{целые}\}.$$

Шаг 6. Вычисление множества значений

$$Z_i = \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor} - \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor + 1}, i = \overline{1, n}, \text{ затем выбор } N_1 \text{ макси-}$$

мальных из них, где множество N_1 определяется как:

$$N_1 = G - \sum_{i=1}^n \lfloor x_i^* \rfloor.$$

Решением исходной задачи (1)–(5) является вектор, включающий отсеченные на шаге 5 целочисленные компоненты, а также N_1 компонент, имеющих значение $\lfloor x_i^* \rfloor + 1$, и $(n - N_1)$ компонент со значением $\lfloor x_i^* \rfloor$.

Шаг 7. Останов.

Приведём математическое обоснование приведённого алгоритма.

Основополагающими результатами для доказательства оптимальности предлагаемого алгоритма служат результаты, полученные в диссертационном исследовании [11]. В данной работе на основе теоретических положений, сформулированных в [12], доказано, что для задачи (1)–(4) отыскание экстремума целевой функции (1) возможно на основе использования метода множителей Лагранжа. Это позволяет доказать, что оптимальным решением задачи (1)–(4) является вектор $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, в котором

$$x_i^* = \begin{cases} \frac{G \sqrt{c_i a_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{c_j a_j}} & \text{при } 0 < x_i \leq a_i; \\ a_i & \text{при } x_i > a_i, \end{cases}$$

$$\text{где } x_i = \frac{G \sqrt{c_i a_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{c_j a_j}}, i = \overline{1, n}.$$

Однако в силу физического смысла задачи (1)–(5), нас интересует оптимальное целочисленное решение, вид которого и определяют доказанные ниже теоремы.

Теорема 1. Пусть $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ – решение задачи (1)–(3) и пусть x_i^* – нецелочисленная компонента найденного решения. Тогда $\min_{x_i \in J} F(x)$, где $J = \{x_i : x_i - \text{целые}, 0 < x_i \leq a_i\}$, равен

$$\min \left(F(x'_1, x'_2, \dots, \lfloor x_i^* \rfloor, \dots, x'_n), \right. \\ \left. F(x''_1, x''_2, \dots, \lfloor x_i^* \rfloor + 1, \dots, x''_n) \right).$$

Здесь $X' = (x'_1, x'_2, \dots, \lfloor x_i^* \rfloor, \dots, x'_n)$ и $X'' = (x''_1, x''_2, \dots, \lfloor x_i^* \rfloor + 1, \dots, x''_n)$ – векторы, компоненты которых удовлетворяют условию (2).

Доказательство теоремы приведено в работе [5].

Из теоремы 1 вытекает важное следствие.

Следствие. Значение целевой функции $F(x)$ задачи (1)–(5) по любой i -й нецелочисленной компоненте не может быть улучшено на векторах, удовлетворяющих условию (2), имеющих в качестве i -й компоненты значения, отличные от $\lfloor x_i^* \rfloor$ и $\lfloor x_i^* \rfloor + 1$. Тем самым это означает, что решение задачи (1)–(5) следует искать среди множества значений $\lfloor x_i^* \rfloor$ и $\lfloor x_i^* \rfloor + 1$ ($i = \overline{1, n}$), удовлетворяющих условию (2).

Теорема 2. Пусть $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ – полностью нецелочисленное решение задачи (1)–(4) и

$$N_1 = G - \sum_{i=1}^n \lfloor x_i^* \rfloor.$$

Выберем N_1 наибольших значений из совокупности

$$z_i = \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor} - \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor + 1}, i = \overline{1, n}.$$

Тогда каждому из выбранных z_i в векторе X^* , являющимся решением задачи (1)–(5), соответствует компонента со значением $\lfloor x_i^* \rfloor + 1$.

Доказательство. Пусть $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ – решение непрерывной задачи (1)–(4) и пусть при этом все x_i^* – нецелочисленные (в противном случае, нецелочисленности переменных можно добиться путем «отбрасывания» целочисленных компонент вектора-решения и соответствующей корректировки балансового условия исходной задачи).

В соответствии с теоремой 1 решение исходной задачи (1)–(5) следует искать среди множества точек $\{\lfloor x_i^* \rfloor, \lfloor x_i^* \rfloor + 1\}$. Поэтому выберем N_1 компонент вектора X^* со значениями $\lfloor x_i^* \rfloor + 1$ таких, что $z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_{N_1} \geq z_{N_1+1} \geq \dots \geq z_n$ (при этом, в случае необходимости, индексы всегда могут быть перенумерованы соответствующим образом).

Докажем теперь, что выбранное таким образом решение исходной целочисленной задачи (1)–(5) является оптимальным, т. е. докажем, что

$$\sum_{i=1}^{N_1} \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor + 1} + \sum_{i=N_1+1}^n \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor} \leq \\ \leq \sum_{i=1, i \neq k}^{N_1} \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor + 1} + \frac{c_k a_k}{\lfloor x_k^* \rfloor} + \\ + \sum_{i=N_1+1, i \neq l}^n \frac{c_i a_i}{\lfloor x_i^* \rfloor} + \frac{c_l a_l}{\lfloor x_l^* \rfloor + 1}$$

при $\forall k < l$, удовлетворяющих условиям $1 \leq k \leq N_1$, $N_1 + 1 \leq l \leq n$.

Для доказательства этого неравенства необходимо убедиться в справедливости соотношения:

$$\frac{c_k a_k}{\lfloor x_k^* \rfloor + 1} + \frac{c_l a_l}{\lfloor x_l^* \rfloor} \leq \frac{c_k a_k}{\lfloor x_k^* \rfloor} + \frac{c_l a_l}{\lfloor x_l^* \rfloor + 1}$$

или, что то же самое:

$$\frac{c_k a_k}{\lfloor x_k^* \rfloor} - \frac{c_k a_k}{\lfloor x_k^* \rfloor + 1} \leq \frac{c_l a_l}{\lfloor x_l^* \rfloor} - \frac{c_l a_l}{\lfloor x_l^* \rfloor + 1}.$$

Справедливость последнего соотношения вытекает из выбора z_k, z_l , что и доказывает утверждение теоремы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе предложенного метода в среде программирования Delphi 5 был создан программный продукт, иллюстрация работоспособности которого производится с использованием исходных данных, приведенных в таблице 1, графы 1–5.

Продолжительность восстановления k -го объекта j -й коммуникации (в сутках) рассчитывается по формульной зависимости:

$$t_{rkj}^B = \frac{a_{rkj}}{x_{rkj}},$$

где a_{rkj} – трудоемкость (в сутках работы соответствующих ВФ) r -го вида восстановительных работ на k -м объекте j -й коммуникации, сутки;

x_{rkj} – наряд ВФ для ведения r -го вида восстановительных работ на k -м объекте j -й коммуникации, единиц.

Решение задачи (1)–(5) нелинейного целочисленного программирования – X_{rkj} (r -фиксировано; $k = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3$), приведенное в графе 6 (табл. 1), является оптимальным в смысле минимизации целевой функции (1), значение которой равно величине 1040. Однако с точки зрения пользователя, которого интересует интерпретация результатов реализации программы в его предметной области, величина 1040 никакой смысловой нагрузки не несёт. Поэтому, чтобы предоставить должностному лицу, осуществляющему решение задачи с целью обоснования плана распределения ресурсов, возможность анализировать результаты решения в привычных ему понятиях, результаты были сведены в электронную таблицу в формате MS Excel.

В силу вышесказанного в 7 и 8 графах таблицы 1 приведены соответственно значения продолжительностей восстановления¹ как отдельных объектов коммуникации, так и коммуникации в целом. Поскольку данные величины носят иллюстративный характер, то и их расчет проводим по приближённым формулам.

1 В силу указанных ниже ограничений под продолжительностью восстановления объектов (коммуникаций) в приведенных формулах будут пониматься продолжительности окончания на них фиксированных (r -х) видов восстановительных работ.

Таблица 1

Результаты решение задачи (1)–(5)

Номер объекта	Номер коммуникации	Трудоемкость работ	Фронт работ	Приоритет	Выделено ВФ	Продолжительность восстановления объекта	Продолжительность восстановления коммуникации
1	1	15	3	100	3	5	5
2	1	4	3	80	3	1,333333333	
3	1	5	2	90	2	2,5	
4	1	4	2	80	2	2	
5	1	4	4	90	3	1,333333333	
	1						3
6	2	3	2	30	1	3	
7	2	3	2	30	1	3	
8	2	3	2	30	1	3	
9	2	3	2	40	2	1,5	
10	2	3	2	30	1	3	4
	2						
11	3	8	3	50	2	4	
12	3	7	3	50	2	3,5	
13	3	3	2	40	2	1,5	
14	3	4	2	40	2	2	4
15	3	5	3	40	2	2,5	
	3						
Значение целевой функции = 1040							

Продолжительность восстановления j -й коммуникации (в сутках) рассчитывается по формульной зависимости:

$$t_{rj}^B = \max_{k \in M_j} t_{rkj}^B,$$

где M_j – множество объектов ТП j -й коммуникации.

Таким образом, сделанные выше пояснения делают достаточно очевидными результаты распределения сил и средств транспортного обеспечения по объектам ТП коммуникаций, представленные в таблице 1.

Теперь для снятия последних неясностей, связанных с определением области применимости предлагаемого метода, необходимо сформулировать использованную при его разработке систему ограничений и допущений, в качестве которых здесь используются:

1. В рамках однократной реализации программы осуществляются расчеты только по одному виду восстановительных работ (как правило, в первую очередь имеет смысл реализовывать расчеты по лимитирующему виду восстановительных работ или по наиболее ограниченному ресурсу).

2. Вид целевой функции предполагает необходимость выделения на каждый объект не менее одного ВФ. (В случае невозможности такой операции необходимо осуществлять укрупнение объектов за счет их объединения в группы).

3. Фронты работ (P_{rkj}) и трудоемкости восстановительных работ (a_{rkj}) на объектах в рамках разработанного метода взаимозаменяемы, и их использование при реализации программного продукта полностью

Рис. 1. Значения целевых функций

определяется заданной технологией выполнения восстановительных работ на объектах ТП коммуникаций.

Отметим, что введенные ограничения не являются достаточно жесткими и могут быть изменены и/или сняты при последующих модификациях предлагаемого метода.

Тестирование разработанного прикладного программного обеспечения на представительном наборе исходных данных (рис. 1) позволило выявить ее «усредненность» по отношению как к равномерному распределению заданного ресурса, так и к распределению, основанному на первоочередном удовлетворении потребностей высокоприоритетных объектов ТП коммуникаций.

Зависимость, представленная на графике, приведенном на рисунке 1, показывает, что вариант реше-

Таблица 2

Удовлетворение потребностей приоритетных объектов

Номер объекта	Номер коммуникации	Трудоемкость работ	Фронт работ	Приоритет	Выделено ВФ	Продолжительность восстановления объекта	Продолжительность восстановления коммуникации
1	1	15	3	100	3	5	5
2	1	4	3	80	3	1,33	
3	1	5	2	90	2	2,5	
4	1	4	2	80	2	2	
5	1	4	4	90	4	1	
6	1						3
6	2	3	2	30	1	3	
7	2	3	2	30	1	3	
8	2	3	2	30	1	3	
9	2	3	2	40	2	1,5	
10	2	3	2	30	1	3	
11	2						
11	3	8	3	50	3	2,67	
12	3	7	3	50	3	2,33	
13	3	3	2	40	1	3	
14	3	4	2	40	1	4	5
15	3	5	3	40	1	5	
15	3						

Значение целевой функции = 1010

ния, определяемый предлагаемым методом (вар. № 3), лучше, в смысле минимизации целевой функции (1), решения сводящегося к равномерному распределению заданного ресурса (вар. № 2), а также решения сводящегося к распределению заданного ресурса по убывающим приоритетам объектов (вар. № 5).

Кроме того, результаты расчетов, приведенных в таблице 2, показывают ухудшение продолжительностей восстановления отдельных коммуникаций для этих случаев (коммуникация № 3, табл. 2), что позволяет учесть этот факт в ходе планирования распределения ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод решения задачи распределения ограниченного целочисленного ресурса может одинаково успешно использоваться в широком диапазоне изменения n . Это объясняется устойчивостью вычислительной схемы метода к изменению размерности задачи, малым количеством проводимых итераций и его быстрой сходимостью к оптимальному решению.

Так, из описания метода легко можно видеть, что количество итераций, требуемое для нахождения оптимального решения задачи (1) – (5), не превосходит $n + 1$. Экспериментальная проверка метода по различным вариантам исходных данных показала гораздо более высокую скорость его сходимости по сравнению с этой верхней оценкой.

Особо следует отметить, что приведённый алгоритм удовлетворяет основополагающим требованиям к организации технического прикрытия объектов на коммуникациях [13]:

- выделение ВФ в первую очередь на объекты с минимальными трудоемкостями восстановления;
- выделение ВФ в соответствии с предполагаемым фронтом работ, что позволяет выдержать технологические сроки восстановления.

Таким образом, в настоящей статье предлагается один из возможных подходов к решению задачи большой размерности планирования распределения ресурсов по объектам ТП коммуникаций, основанного на решении задачи в виде модели целочисленного программирования специального вида и предлагаемого метода нахождения её рационального решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.К., Бабошин В.А. Оптимальное формирование контуров управления // Автоматизация процессов управления. 2018. № 4 (54). С. 4–11.
2. Иванов А.К., Бабошин В.А. Модели формирования специального математического обеспечения АСУ // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 4–14.
3. Ермольев Ю.М. Экстремальные задачи на графах. Киев : Наукова думка, 1968. 176 с.
4. Зуховицкий С.И., Радчик И.А. Математические методы сетевого планирования. М. : Наука, 1965. 296 с.

5. Михалевич В.С., Куksa А.И. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах распределения ресурсов. М. : Наука, 1983. 208 с.

6. Нечепуренко М.И., Попков В.К., Майнагашев С.М. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях. Новосибирск : Наука, 1990. 514 с.

7. К вопросу надёжности унифицированного восстановительного комплекса железнодорожной автоматики и телемеханики / В.А. Бабошин, Р.А. Пантелеев, К.Н. Савинов, В.Г. Козловский // Автоматизация процессов управления. 2019. № 4 (58). С. 22–33.

8. Плотников В.А., Черных А.К. Время, вперед! Использование математического моделирования в управлении организациями // Российское предпринимательство. 2005. № 12. С. 57–62.

9. Примакин А.И., Черных А.К., Яковлева Н.А. Применение методов математического моделирования для оптимизации распределения сил и средств полиции при осложнении оперативной обстановки // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2015. № 2 (66). С. 148–152.

10. Черных А.К., Буданов Д.С. Моделирование распределения сил и средств подразделений государственной противопожарной службы МЧС России на газотранспортной системе // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2015. № 4 (16). С. 24–31.

11. Черных А.К. Моделирование системы технического прикрытия железнодорожной сети в операциях : дисс. ... докт. техн. наук. СПб. : БАТТ, 2011. 358 с.

12. Зайченко Ю.П. Исследование операций. Киев : Вища школа, 1979. 392 с.

13. Сизов Е.Б. Организация технического прикрытия железных дорог: монография. СПб. : ВТУ ЖДВ, 2008. 238 с.

REFERENCES

1. Ivanov A.K., Baboshin V.A. Optimalnoe formirovanie konturov upravleniia [Optimal Creation of Control Loops]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2018, no. 4 (54), pp. 4–11.
2. Ivanov A.K., Baboshin V.A. Modeli formirovaniia spetsialnogo matematicheskogo obespecheniia ASU [Models for Creating the Special-Purpose Mathematical Support of Computer-Aided Control Systems]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 2 (56), pp. 4–14.
3. Ermoliev Yu.M. *Ekstremalnye zadachi na grafakh* [Extremum Graph Problem]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1968. 176 p.
4. Zuhovitskii S.I., Radchik I.A. *Matematicheskie metody setevogo planirovaniia* [Mathematical Methods of Network Analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 296 p.
5. Mikhalevich V.S., Kuksa A.I. *Metody posledovatelnoi optimizatsii v diskretnykh setevykh zadachakh raspredeleniia resursov* [Sequential Optimization Methods for Discrete Network Problems of Resource Allocation]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 208 p.

6. Nechepurenko M.I., Popkov V.K., Mainagashev S.M. *Algoritmy i programmy resheniia zadach na grafakh i setiakh* [Algorithms and Programmes for Solving the Graph and Network Problems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 514 p.
7. Baboshin V.A., Panteleev R.A., Savinov K.N., Kozlovskii V.G. K voprosu nadezhnosti unifitsirovannogo vosstanovitelnogo kompleksa zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [To the Issue of Reliability of a Unified Restoration Complex of Railway Automation and Telemechanics]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 4 (58), pp. 22–33.
8. Plotnikov V.A., Chernykh A.K. Vremia, vpered! Ispolzovanie matematicheskogo modelirovaniia v upravlenii organizatsiiami [Roll on, Time! Use of Mathematical Modeling in Enterprise Management]. *Rossiiskoe predprinimatelstvo* [Russian Journal of Entrepreneurship], 2005, no. 12, pp. 57–62.
9. Primakin A.I., Chernykh A.K., Iakovleva N.A. Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniia dlia optimizatsii raspredeleniia sil i sredstv politsii pri oslozhenii operativnoi obstanovki [Application of Methods of Mathematical Modeling for Optimization of Distribution of Forces and Means of Police at Complication of an Operational Situation]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii* [Proc. of the St. Petersburg University of the MIA of Russia], 2015, no. 2 (66), pp. 148–152.
10. Chernykh A.K., Budanov D.S. Modelirovanie raspredeleniia sil i sredstv podrazdelenii gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii na gazotransportnoi sisteme [Simulation of Distribution of Forces and Means Units of State Fire Service of EMERCOM of Russia for Gas Transportation System]. *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)* [Nature and Industrial Risks (Physical, Mathematical, and Applied Aspects)], 2015, no. 4 (16), pp. 24–31.
11. Chernykh A.K. *Modelirovanie sistemy tekhnicheskogo prikrytiia zheleznodorozhnoi seti v operatsiakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Simulation of the System for Technical Railway Cover Facilities During Operations. Dr. Eng. Sci. Diss.]. St. Petersburg, VATT Publ., 2011. 358 p.
12. Zaichenko Iu.P. *Issledovanie operatsii* [Operations Research]. Kiev, Vishcha Shkola Publ., 1979. 392 p.
13. Sizov E.B. *Organizatsiia tekhnicheskogo prikrytiia zheleznikh dorog. Monografiia* [Building up the Technical Cover Facilities of Railroad Communications. Monograph]. St. Petersburg, VTU ZhDV Publ., 2008. 238 p.