

# МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МЕЖЦЕХОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ<sup>1</sup>

**Хрусталева Ирина Николаевна**

кандидат технических наук,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

[irina.khrustaleva@mail.ru](mailto:irina.khrustaleva@mail.ru)

## THE OPTIMIZATION MODEL OF THE INTER-SHOP TRANSPORT OPERATIONS PARAMETERS

**I. Khrustaleva**

**Summary.** The paper discusses the issues of multi-criteria optimization of target indicators of the process of cargo movement between individual production units of a machine-building enterprise. The transport system is one of the key elements of the logistics system at the machine-building enterprise. Thus, optimizing the parameters of transport operations is one of the key tasks of the logistics system of a machine-building enterprise. The paper presents a structural hierarchical model for optimizing the parameters of transport operations implemented between individual production units of the enterprise — inter-shop transport operations. The structure of the optimization model of inter-shop transport routes includes two control levels: transport operation, transport route. For each control level, groups of targets and control parameters are defined, as well as boundary conditions for the model implementation. The task of the first management level is to optimize the structure of the transport operation. The second control level optimizes the structure of the transport route. The paper presents the practical implementation of the developed optimization model using the example of an inter-shop transport route. As part of the study, the structure of the transport operation of the transport route was optimized. The paper presents the results of optimization of the structure of the inter-shop transport route, consisting of six transport sections, within which 15 consignments of goods with a total weight of 2.225 tons are transported. The parameters of the transport route were determined on the basis of multi-criteria optimization based on the following target indicators: labor intensity of the transport route, the value of operational costs for the implementation of the transport route (OPEX), the coefficient of efficiency of using the vehicle for carrying capacity, the coefficient of efficiency of the transport route for the time of delivery of cargo, the length of the transport route.

**Keywords:** Multi-Criteria Optimization, Inter-shop Transport Route, Transportation Section, Targets, Enterprise Logistics System.

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы многокритериальной оптимизации целевых показателей процесса перемещения грузов между отдельными производственными подразделениями машиностроительного предприятия. Транспортная система является одним из ключевых элементов системы логистики на машиностроительном предприятии. Таким образом, оптимизация параметров транспортных операций, является одной из ключевых задач системы логистики машиностроительного предприятия. В работе представлена структурная иерархическая модель оптимизации параметров транспортных операций, реализуемых между отдельными производственными подразделениями предприятия — межцеховые транспортные операции. Структура оптимизационной модели межцеховых транспортных маршрутов включает в себя два уровня управления: транспортная операция, транспортный маршрут. Для каждого уровня управления определены группы целевых показателей и параметров управления, а также граничные условия реализации модели. Задачей первого уровня управления является оптимизация структуры транспортной операции. На втором уровне управления производится оптимизация структуры транспортного маршрута. В работе представлена практическая реализация разработанной оптимизационной модели на примере межцехового транспортного маршрута. В рамках исследования проведена оптимизация структуры транспортной операции транспортного маршрута. В работе представлены результаты оптимизации структуры межцехового транспортного маршрута, состоящего из шести транспортных участков, в рамках которых производится перемещение 15 партий грузов общей массой 2,225 т. Определение параметров транспортного маршрута производилось на основе многокритериальной оптимизации на основе следующих целевых показателей: трудоемкость реализации транспортного маршрута, величина операционных затрат на реализацию транспортного маршрута (OPEX), коэффициент эффективности использования транспортного средств по грузоподъемности, коэффициент эффективности транспортного маршрута по времени доставки груза, длина транспортного маршрута.

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, межцеховой транспортный маршрут, транспортный участок, целевые показатели, логистическая система предприятия.

## Введение

Уровень эффективности производственной системы предприятия напрямую зависит от эффективности функционирования отдельных его подсистем [1,2].

Транспортные операции является неотъемлемой частью производственного процесса машиностроительного предприятия. В рамках системы логистики машиностроительного предприятия можно выделить три категории транспортных операций: межцеховое перемещение

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23–29–00551 от 13.01.2023 «Методы и алгоритмы построения интеллектуальных киберфизических систем для обеспечения семантической интероперабельности».

грузов, внутрицеховое перемещение грузов и перемещение грузов в рамках складского помещения. Эффективность реализации каждой категории транспортных операций непосредственно влияет на общую эффективность системы логистики и производственного процесса в целом.

В рамках данной работы будет рассмотрен вопрос оптимизации транспортных маршрутов, реализуемых между отдельными производственными подразделениями предприятия — межцеховая транспортная система предприятия (МцТрС).

Для повышения эффективности производственной деятельности промышленного предприятия необходимо построение эффективных цепочек поставок в рамках производственной системы [3,4].

Стремительное развития цифровых технологий является ключевым фактором для разработки и внедрения более эффективных методов проектирования и анализа логистических систем, а также их управления [5-7].

В настоящее время логистика является быстроразвивающейся отраслью науки, в рамках которой производится решение трудоемких задач по моделированию и оптимизации сложных процессов, предусматривающих анализ большого объема данных [8–11] с применением инструментов Data Science [12,13]. Повышение уровня цифровизации в области логистики позволяет внедрять системы, в основе которых более сложных алгоритмах и математических моделях [14–20].

Целью работы является повышение эффективности процессов планирования и управления транспортными межцеховыми потоками. Объектом исследования является межцеховая транспортная операция.

**Модель оптимизации межцеховых транспортных операций**

Модель оптимизации процесса межцехового перемещения грузов имеет два уровня управления:

1. Уровень №1: Межцеховая транспортная операция.
2. Уровень №2: Межцеховой транспортный маршрут.

В рамках первого уровня управления производится формирование и оптимизация структур отдельных межцеховых транспортных операций. Формирование структуры межцеховых транспортных операций производится на основе множеств единичных межцеховых транспортных операций (ЕдМцТО), сформированных для соответствующих единиц транспортных средств, —  $M_{ikn}^{ЕдМцТО}$ . Единичная межцеховая транспортная опера-

ция — это транспортная операция, в рамках которой производится перемещение партии груза в пределах одного межцехового транспортного участка (МцТрУ).

В рамках первого уровня управления определены следующие задачи оптимизации: оптимизация средних значений величин трудоемкости, операционных затрат и коэффициента использования грузоподъемности транспортного средства для соответствующей межцеховой транспортной операции; оптимизация общей массы перемещаемого груза в рамках соответствующей межцеховой транспортной операции.

Оптимизация параметров межцеховой транспортной операции производится на основе векторного критерия оптимизации (1):

$$F_1^{МцТрОп} (U_1^{МцТрОп}) = (OPEX_{ikn}^{МцТрОп})_{1..l}^{cp} (U_1^{МцТрОп}),$$

$$\left( T_{ikn}^{МцТрОп} \right)_{1..l}^{cp} (U_1^{МцТрОп}), \left( M_{ikn}^{гп} \right)_{1..l}^{МцТрОп} (U_1^{МцТрОп}),$$

$$\left( (K_s^G)_{ikn1..l}^{cp} \right)_{1..l}^{МцТрОп} (U_1^{МцТрОп})$$

где  $F_1^{МцТрОп}$  — векторный критерий оптимизации для межцеховой транспортной операции;  $U_1^{МцТрОп}$  — множество параметров управления для оптимизации структуры межцеховой транспортной операции;  $\left( T_{ikn}^{МцТрОп} \right)_{1..l}^{cp}$  — средняя величина трудоемкости реализации 1...l-ой межцеховой транспортной операции, выполняемой с применением транспортного средства i-ого типа k-ой группы n-ого наименования, мин.;  $\left( OPEX_{ikn}^{МцТрОп} \right)_{1..l}^{cp}$  — средняя величина операционных затрат, возникающих в результате реализации 1...l-ой межцеховой транспортной операции, выполняемой с применением транспортного средства i-ого типа k-ой группы n-ого наименования, мин.;  $\left( M_{ikn}^{гп} \right)_{1..l}^{МцТрОп}$  — общая масса груза, перемещаемого в рамках 1...l-ой межцеховой транспортной операции, реализуемой с применением транспортного средства i-ого типа k-ой группы n-ого наименования, кг.;  $\left( (K_s^G)_{ikn} \right)_{1..l}^{cp}$  — среднее значение коэффициента использования грузоподъемности транспортного средства i-ого типа k-ой группы n-ого наименования, применяемого для реализации 1...l-ой межцеховой транспортной операции.

Определены следующие критерии оптимизации и граничные условия реализации модели для первого уровня управления:

- Критерии оптимизации:  $\left( OPEX_{ikn}^{МцТрОп} \right)_{1..l}^{cp} \rightarrow \min,$   
 $\left( T_{ikn}^{МцТрОп} \right)_{1..l}^{cp} \rightarrow \min,$   $\left( M_{ikn}^{гп} \right)_{1..l}^{МцТрОп} \rightarrow \max,$   
 $\left( (K_s^G)_{ikn} \right)_{1..l}^{cp} \rightarrow \max.$

- Граничные условия реализации модели (2)–(5):

$$\sum_{l=1}^t (OPEX_{ikn}^{MцТрОп})_l^{cp} \leq OPEX^{CMцТрГ} \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^t (T_{ikn}^{MцТрОп})_l^{cp} \leq T^{CMцТрГ} \quad (3)$$

$$(M_{ikn}^{Гр})_l^{MцТрОп} \leq G_{ikn}^{TC} \cdot (N_{ikn}^{ТрУ})_l^{MцТрОп} \quad (4)$$

$$\left( (K_s^G)_{ikn}^{cp} \right)_l^{MцТрОп} \geq \left( (K_s^G)_{ikn}^{cp} \right)_l^{min} \quad (5)$$

где  $OPEX^{CMцТрГ}$  — величина операционных затрат, возникающих в рамках межцеховой транспортной системы, руб.;  $T^{CMцТрГ}$  — величина трудоемкости реализации

транспортных операций в рамках межцеховой транспортной системы, ч.;  $G_{ikn}^{TC}$  — грузоподъемность транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, т.;  $\left( (K_s^G)_{ikn}^{cp} \right)_l^{min}$  — минимальное среднее значение коэффициента использования грузоподъемности транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, применяемого для реализации  $l$ -ой межцеховой транспортной операции;  $t$  — количество межцеховых транспортных операций, реализуемых с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, шт.

Определена структура модели для оптимизации параметров межцеховой транспортной операции (6).

$$\left\{ \begin{aligned} & \left( OPEX_{ikn}^{MцТрОп} \right)_l^{cp} = \left( (OPEX_{ам}^{MцТрОп})_{ikn} \right)_l^{cp} + \left( (OPEX_{рем/обсл}^{MцТрОп})_{ikn} \right)_l^{cp} \rightarrow \min \\ & \left( T_{ikn}^{MцТрОп} \right)_l^{cp} = \frac{(l_{ikn}^{MцТрУ})_l^{cp} \cdot (N_{ikn}^{MцТрУ})_l^{cp}}{60000 \cdot V_{ikn}^{TC}} + \frac{(t_{ep}^{ПРО})_{ikn}^{MцТрОп} \cdot (N_{ikn}^{ПРО})_{ikn}^{MцТрОп}}{60} \rightarrow \min \\ & \left( M_{ikn}^{Гр} \right)_l^{MцТрОп} = \frac{\sum_{z=1}^q \left( (m_l^{ТрП})_{ikn} \right)_z^{MцТрОп}}{1000} \rightarrow \max \\ & \left( (K_s^G)_{ikn}^{cp} \right)_l^{MцТрОп} = \frac{(M_{ikn}^{Гр})_l^{MцТрОп}}{(N_{ikn}^{MцТрУ})_l^{MцТрОп}} \cdot G_{ikn}^{TC} \rightarrow \max \\ & \sum_{l=1}^t (OPEX_{ikn}^{MцТрОп})_l^{cp} \leq OPEX^{CMцТрГ} \\ & \sum_{l=1}^t (T_{ikn}^{MцТрОп})_l^{cp} \leq T^{CMцТрГ} \\ & (M_{ikn}^{Гр})_l^{MцТрОп} \leq G_{ikn}^{TC} \cdot (N_{ikn}^{ТрУ})_l^{MцТрОп} \\ & \left( (K_s^G)_{ikn}^{cp} \right)_l^{MцТрОп} \geq \left( (K_s^G)_{ikn}^{cp} \right)_l^{min} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $(OPEX_{ikn}^{MцТрОп})_l^{cp}$  — средняя величина операционных затрат на выплату заработной платы производственным рабочим, задействованным в реализации  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, выполняемой с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, руб.;  $\left( (OPEX_{ам}^{MцТрОп})_{ikn} \right)_l^{cp}$  — средняя величина операционных затрат на амортизационные отчисления на транспортное средство  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, применяемого для реализации  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, руб.;  $\left( (OPEX_{рем/обсл}^{MцТрОп})_{ikn} \right)_l^{cp}$  — средняя величина операционных затрат на ремонт и обслуживание транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, приме-

няемого для реализации  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, руб.;  $(l_{ikn}^{MцТрУ})_l^{cp}$  — средняя длина межцехового транспортного участка, реализуемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, м;  $(N_{ikn}^{MцТрУ})_l^{cp}$  — количество межцеховых транспортных участков, реализуемых в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, м;  $V_{ikn}^{TC}$  — скорость перемещения транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, км/час.;  $(t_{ep}^{ПРО})_{ikn}^{MцТрОп}$  — среднее время выполнения погрузочно-разгрузочной операции, реализуемой в рамках межцеховой транспортной операции с применением

транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, мин.;  $(N_{ikn}^{ПРО})^{МцТрОп}$  — количество погрузочно-разгрузочных операций, выполняемых в рамках межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, шт.;  $(m_i^{ТрП})_{ikn}^{МцТрОп}$  — масса  $z$ -ой транспортной партии, перемещаемой в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, кг.;  $(M_{ikn}^{гр})_l^{МцТрОп}$  — общая масса груза, перемещаемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, реализуемой с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, кг.;  $G_{ikn}^{TC}$  — величина грузоподъемности транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, т.;  $q$  — количество транспортных партий, перемещаемых в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, реализуемой с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, шт.;  $t$  — количество межцеховых транспортных операций, выполняемых в рамках производственного подразделения, шт.

В рамках первого уровня управления определено следующее множество параметров управления (7):

$$U_1^{МцТрОп} = \left\{ \left( N_{ikn}^{МцТрОп} \right)_l, \left( m_i^{ТрП} \right)_{ikn}^{МцТрОп} \right\} \quad (7)$$

На втором уровне управления производится оптимизация параметров межцеховых транспортных маршрутов. В рамках второго уровня управления определены следующие задачи оптимизации: оптимизация величин трудоемкости и операционных затрат для соответствующих межцеховых транспортных маршрутов; оптимизация общей длины межцеховых транспортных маршрутов; оптимизация эффективности использования транспортных средств по грузоподъемности при реализации отдельных межцеховых транспортных маршрутов; оптимизации эффективности отдельных межцеховых транспортных маршрутов по времени доставки груза.

На втором уровне управления определена следующая структура векторного критерия оптимизации (8):

$$F_2^{МцТрМ}(U_2^{МцТрМ}) = \left( OPEX_l^{МцТрМ} \right)_{1..f} (U_2^{МцТрМ}), \left( T_l^{МцТрМ} \right)_{1..f} (U_2^{МцТрМ}), \left( K_{эф}^G \right)_l^{МцТрМ} (U_2^{МцТрМ}), \left( K_{эф}^t \right)_l^{МцТрМ} (U_2^{МцТрМ}), \left( L_{ikn}^{МwТрМ} \right)_{(1..l)(1..f)} (U_2^{МцТрМ}) \quad (8)$$

где  $F_2^{МцТрМ}$  — векторный критерий оптимизации для межцехового транспортного маршрута в рамках второго

уровня управления;  $U_2^{МцТрМ}$  — множества параметров управления для оптимизации межцехового транспортного маршрута;  $(OPEX_l^{МцТрМ})_{1..f}$  — величина операционных затрат, возникающих в результате реализации  $1..f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, мин.;  $(T_l^{МцТрМ})_{1..f}$  — величина трудоемкости реализации  $1..f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, мин.;  $(K_{эф}^G)_l^{МцТрМ}$  — коэффициент эффективности использования транспортного средства по грузоподъемности в процессе реализации  $1..f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции;  $(K_{эф}^t)_l^{МцТрМ}$  — коэффициент эффективности по времени доставки груза  $1..f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции;  $(L_{ikn}^{МwТрМ})_{(1..l)(1..f)}$  — длина  $1..f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $1..l$ -ой межцеховой транспортной операции, м.

Определены следующие критерии оптимизации и граничные условия реализации модели в рамках второго уровня управления:

$$\begin{aligned} \text{Критерии оптимизации: } & (OPEX_l^{МцТрМ})_{1..f} \rightarrow \min, \\ & (T_l^{МцТрМ})_{1..f} \rightarrow \min, \quad \left( (K_{эф}^G)_l^{МцТрМ} \right)_{1..f} \rightarrow \max, \\ & \left( (K_{эф}^t)_l^{МцТрМ} \right)_{1..f} \rightarrow \max, \quad (L_{ikn}^{МwТрМ})_{(1..l)(1..f)} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Граничные условия реализации модели (9)–(12):

$$\sum_{f=1}^f (OPEX_{ikn}^{МцТрМ})_{if} \leq OPEX^{CMцТрГ} - OPEX_{ПРО}^{CMцТрГ} \quad (9)$$

$$\sum_{f=1}^f (T_{ikn}^{МцТрМ})_{if} \leq T^{CMцТрГ} - T_{ПРО}^{CMцТрГ} \quad (10)$$

$$\left( (K_{эф}^G)_{опт}^{МцТрМ} \right)_f \geq \left( \left( (K_{эф}^G)_l^{МцТрМ} \right)_f \right)_{\min} \quad (11)$$

$$\left( (K_{эф}^t)_{опт}^{МцТрМ} \right)_f \geq \left( \left( (K_{эф}^t)_l^{МцТрМ} \right)_f \right)_{\min} \quad (12)$$

где  $OPEX_{ПРО}^{CMцТрГ}$  — величина операционных затрат, возникающих в результате выполнения погрузочно-разгрузочных операций, реализуемых в рамках межцеховой транспортной системы, ч.;  $(T_f^{МцТрМ})^{CMцТрГ}$  — величина трудоемкости выполнения  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, реализуемого в рамках межцеховой

транспортной системы, руб.;  $T_{\text{ППО}}^{\text{СМнТрГ}}$  — величина трудоемкости выполнения погрузочно-разгрузочных операций, реализуемых в рамках межцеховой транспортной системы, ч.;  $\left( \left( K_{\text{эф}}^G \right)_l^{\text{МнТрМ}} \right)_f$  — минимальное значение коэффициента эффективности использования транспортного средства по грузоподъемности в процессе реализации  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транс-

портной операции;  $\left( \left( K_{\text{эф}}^t \right)_l^{\text{МнТрМ}} \right)_f$  — минимальное значение коэффициента эффективности доставки груза по времени при реализации  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции;  $l$  — количество межцеховых транспортных операций, реализуемых в рамках системы межцеховой транспортной системы, шт.

Определена структура модели для оптимизации параметров межцехового транспортного маршрута (13).

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \left( OPEX_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if} = \left( OPEX_{ikn}^{\text{зн}} \right)_{if}^{\text{МнТрМ}} + \left( OPEX_{ikn}^{\text{ам}} \right)_{if}^{\text{МнТрМ}} + \left( OPEX_{ikn}^{\text{рем/обсл}} \right)_{if}^{\text{МнТрМ}} \rightarrow \min \\
 & \left( T_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if} = \frac{\sum_{g=1}^{N_{ikn}^{\text{МнТрУ}}} \left( \left( I_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_{if} \right)_g}{60000 \cdot V_{ikn}^{\text{ТС}}} + \frac{\left( T_{\text{ППО}}^{\text{МнТрОп}} \right)_l}{60} \rightarrow \min \\
 & \left( \left( K_{\text{эф}}^G \right)_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if} = \frac{\sum_{g=1}^{N_{ikn}^{\text{МнТрУ}}} \left( \left( M_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_{if} \right)_g \cdot \left( \left( I_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_{if} \right)_g}{1000 \cdot G_{ikn}^{\text{ТС}} \cdot \left( L_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if}} \rightarrow \max \\
 & \left( \left( K_{\text{эф}}^t \right)_l^{\text{МнТрМ}} \right)_f = \sum_{z=1}^q \frac{\left( \left( t_{ikn}^{\text{min}} \right)_l^{\text{ТрП}} \right)_z \cdot \left( \left( \beta_{ikn}^{\text{ТрП}} \right)_l^{\text{МнТрМ}} \right)_z}{\left( \left( T_{ikn}^{\text{ТрП}} \right)_{if} \right)_z} \rightarrow \max \\
 & \left( L_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if} = \sum_{g=1}^{N_{ikn}^{\text{МнТрУ}}} \left( \left( I_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_{if} \right)_g \rightarrow \min \\
 & \sum_{f=1}^r \left( OPEX_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if} \leq OPEX^{\text{СМнТрГ}} - OPEX_{\text{ППО}}^{\text{СМнТрГ}} \\
 & \sum_{f=1}^r \left( T_{ikn}^{\text{МнТрМ}} \right)_{if} \leq T^{\text{СМнТрГ}} - T_{\text{ППО}}^{\text{СМнТрГ}} \\
 & \left( \left( K_{\text{эф}}^G \right)_{\text{опт}}^{\text{МнТрМ}} \right)_f \geq \left( \left( K_{\text{эф}}^G \right)_l^{\text{МнТрМ}} \right)_f^{\min} \\
 & \left( \left( K_{\text{эф}}^t \right)_{\text{опт}}^{\text{МнТрМ}} \right)_f \geq \left( \left( K_{\text{эф}}^t \right)_l^{\text{МнТрМ}} \right)_f^{\min}
 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

где  $\left( OPEX_{ikn}^{\text{зн}} \right)_{if}^{\text{МнТрМ}}$  — величина операционных затрат на выплату заработной платы производственным рабочим, задействованным в реализации  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, руб.;  $\left( OPEX_{ikn}^{\text{ам}} \right)_{if}^{\text{МнТрМ}}$  — величина операционных затрат на амортизационные отчисления на транспортное средство  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, применяемого в процессе реализации  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, руб.;  $\left( OPEX_{ikn}^{\text{рем/обсл}} \right)_{if}^{\text{МнТрМ}}$  — величина операционных затрат на ремонт и обслуживание транспортного

средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, применяемого в процессе реализации  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, руб.;  $\left( \left( I_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_{if} \right)_g$  — длина  $g$ -ого транспортного участка, реализуемого в рамках  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, м.;  $\left( \left( M_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_{if} \right)_g$  — общая масса груза, перемещаемого в рамках  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, кг.;  $G_{ikn}^{\text{ТС}}$  — грузо-

подъемность транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования,  $t; \left( T_{\text{ПРО}}^{\text{МнТрОп}} \right)_i$  — общая трудоемкость реализации погрузочно-разгрузочных операций, выполняемых в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, мин.;  $\left( t_{ikn}^{\text{min}} \right)_i^{\text{ТрП}}$  — минимальная величина трудоемкости перемещения  $z$ -ой транспортной партии в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, реализуемого с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, мин.;  $\left( \beta_{ikn}^{\text{ТрП}} \right)_i^{\text{МнТрМ}}$  — удельной вес  $z$ -ой транспортной партии в общей массе перемещаемого груза в рамках  $l$ -ого межцеховой транспортной операции, реализуемой с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования;  $\left( T_{ikn}^{\text{ТрП}} \right)_f^z$  — расчетная величина трудоемкости перемещения  $z$ -ой транспортной партии в процессе реализации  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ого межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, мин.;

$\left( l_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_f^g$  — длина  $g$ -ого межцехового транспортного участка, реализуемого в рамках  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ого межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, м;  $ОРЕХ_{\text{ПРО}}^{\text{СМнТрГ}}$  — величина операционных затрат на реализацию погрузочно-разгрузочных операций, выполняемых в рамках межцеховой транспортной системы, руб.;  $T_{\text{ПРО}}^{\text{СМнТрГ}}$  — общая трудоемкость реализации погрузочно-разгрузочных операций, выполняемых в рамках межцеховой транспортной системы, ч;  $\left( N_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_f$  — количество межцеховых транспортных участков, реализуемых в рамках  $f$ -ого межцехового транспортного маршрута, выполняемого в рамках  $l$ -ого межцеховой транспортной операции с применением транспортного средства  $i$ -ого типа  $k$ -ой группы  $n$ -ого наименования, шт.;  $q$  — количество транспортных партий, перемещаемых в рамках  $l$ -ой межцеховой транспортной операции, шт.;  $r$  — количество межцеховых транспортных участков, реализуемых в рамках межцеховой транспортной системы, шт.

В рамках второго уровня управления определено следующее множество параметров управления для оптимизации межцехового транспортного маршрута (14):

$$U_2^{\text{МнТрМ}} = \left\{ \left( l_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_f^g, \left( N_{ikn}^{\text{МнТрУ}} \right)_f, \left( T_{ikn}^{\text{ТрП}} \right)_f^z \right\} \quad (14)$$

### Оптимизация параметров межцехового транспортного маршрута

В рамках исследование проведена оптимизация параметров межоперационного транспортного маршрута. Анализируемый транспортный маршрут содержит 6 транспортных участков, в рамках которых производится перемещение 15 партий грузов. Транспортные партии, перемещаемые в рамках исследуемого транспортного маршрута, имеют следующие массы:  $m_1 = 150$  кг;  $m_2 = 250$  кг;  $m_3 = 98$  кг;  $m_4 = 128$  кг;  $m_5 = 56$  кг;  $m_6 = 148$  кг;  $m_7 = 265$  кг;  $m_8 = 420$  кг;  $m_9 = 102$  кг;  $m_{10} = 130$  кг;  $m_{11} = 46$  кг;  $m_{12} = 75$  кг;  $m_{13} = 63$  кг;  $m_{14} = 164$  кг;  $m_{15} = 160$  кг. Таким образом, общая масса перемещаемого груза в рамках межцехового транспортного маршрута составляет 2,255 т.

В таблице 1 представлены расстояния между отдельными пунктами транспортного маршрута.

Таблица 1.

Значения расстояний между отдельными пунктами транспортного маршрута, м

	Склад	Пункт №1	Пункт №2	Пункт №3	Пункт №4	Пункт №5
Склад	0	147,3	390,8	369,7	585,3	563,8
Пункт №1	147,3	0	267,3	222,4	445,9	416,4
Пункт №2	390,8	267,3	0	183,5	220,4	266,1
Пункт №3	369,7	222,4	183,5	0	250,4	195,3
Пункт №4	585,3	445,9	220,4	250,4	0	128,8
Пункт №5	563,8	416,4	266,1	195,3	128,8	0

По результатам исследования определены пять транспортных маршрутов доступные для реализации и оптимальные по Парето:

- Транспортный маршрут №1: Склад  $\Rightarrow$  Пункт №1  $\Rightarrow$  Пункт №2  $\Rightarrow$  Пункт №3  $\Rightarrow$  Пункт №4  $\Rightarrow$  Пункт №5  $\Rightarrow$  Склад.
- Транспортный маршрут №2: Склад  $\Rightarrow$  Пункт №1  $\Rightarrow$  Пункт №2  $\Rightarrow$  Пункт №3  $\Rightarrow$  Пункт №5  $\Rightarrow$  Пункт №4  $\Rightarrow$  Склад.
- Транспортный маршрут №3: Склад  $\Rightarrow$  Пункт №2  $\Rightarrow$  Пункт №1  $\Rightarrow$  Пункт №4  $\Rightarrow$  Пункт №3  $\Rightarrow$  Пункт №5  $\Rightarrow$  Склад.
- Транспортный маршрут №4: Склад  $\Rightarrow$  Пункт №2  $\Rightarrow$  Пункт №3  $\Rightarrow$  Пункт №1  $\Rightarrow$  Пункт №4  $\Rightarrow$  Пункт №5  $\Rightarrow$  Склад.
- Транспортный маршрут №5: Склад  $\Rightarrow$  Пункт №2  $\Rightarrow$  Пункт №3  $\Rightarrow$  Пункт №1  $\Rightarrow$  Пункт №4  $\Rightarrow$  Пункт №5  $\Rightarrow$  Склад.

В рамках работы определена следующая стратегия оптимизации:

$$(T_{121}^{MnTpM})_{11} \rightarrow \min \quad (15)$$

График зависимостей целевых показателей для данных транспортных маршрутов представлен на рисунке 1.

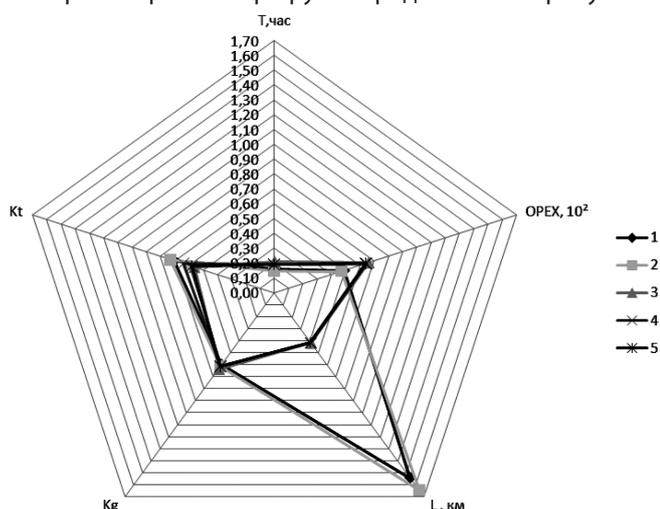


Рис. 1. График зависимостей целевых показателей для транспортных маршрутов оптимальных по Парето

## Выводы

Согласно выбранной стратегии (15), оптимальным межцеховым транспортным маршрутом является вариант №2: Транспортный маршрут №2: Склад ⇒ Пункт №1 ⇒ Пункт №2 ⇒ Пункт №3 ⇒ Пункт №5 ⇒ Пункт №4 ⇒ Склад. Для данного межцехового транспортного маршрута установлены следующие значения целевых показателей:  $(T_{121}^{MnTpM})_{12} = 0,15$  ч.;  $(OPEX_{121}^{MnTpM})_{12} = 47$  руб.;  $((K_{эф}^G)_{121}^{MnTpM})_{12} = 0,61$ ;  $((K_{эф}^t)_{121}^{MnTpM})_2 = 0,73$ ;  $(L_{121}^{MnTpM})_{12} = 1,64$  км.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бровкина Я.Ю., Хрусталева И.Н., Хрусталева М.Б., Хохловский В.Н., Шкодырев В.П. Иерархическая модель оптимизации технологических параметров комплекса рабочих переходов для процесса механической обработки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.24143/2072-9502—2024-2-7-20>. EDN YWJDNM.,
- Kostenko D., Arseniev D., Shkodyrev V., Onufriev V. Pareto optimization in oil refinery // Data Mining and Big Data. Communications in Computer and Information Science. 2020. P. 26–33
- Lanqing Liu, Research on the Management System of enterprises using Modern Logistics Supply Chain Theory, Procedia Engineering, Volume 24, 2011, Pages 721–725, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2725>
- Manuel Woschank, Daniel Steinwiedder, Alexander Kaiblinger, Philipp Miklautsch, Corina Pacher, Helmut Zsifkovits, The Integration of Smart Systems in the Context of Industrial Logistics in Manufacturing Enterprises, Procedia Computer Science, Volume 200, 2022, Pages 727–737, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.271>.
- Xue Yang, Langxuan Pan, Aifeng Song, Xiangqian Ma, Juan Yang, Research on the strategy of knowledge sharing among logistics enterprises under the goal of digital transformation, Heliyon, Volume 9, Issue 4, 2023, e15191, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15191>.
- Yi Xiao, Kevin X. Li, Guanqiu Qi, Mengjie Jin, Game relations between platform enterprises and participants of digital interaction-sharing platforms in the maritime logistics industry, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 178, 2023, 103292, ISSN 1366-5545, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103292>.
- Ksenia Maiorova, Development of industrial products of industrial and logistics enterprises, Transportation Research Procedia, Volume 63, 2022, Pages 2030–2038, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.226>.
- Pavel Mishkurov, Oleg Fridrikhson, Vadim Lukyanov, Sergey Kornilov, Vasily Say, Simulated Transport and Logistics Model of a Mining Enterprise, Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021, Pages 411–418, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.090>.
- S. Liu, S. Hennequin, D. Roy, Enterprise Platform of Logistics Services Based on a Multi-Agents Mechanism and Blockchains, IFAC-PapersOnLine, Volume 54, Issue 1, 2021, Pages 825–830, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.097>.
- Pavel Mishkurov, Oleg Fridrikhson, Vadim Lukyanov, Sergey Kornilov, Vasily Say, Simulated Transport and Logistics Model of a Mining Enterprise, Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021, Pages 411–418, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.090>.
- Musavarah Sarwar, Muhammad Akram, Wajeeha Gulzar, Muhammet Devci, Group decision making method for third-party logistics management: An interval rough cloud optimization model, Journal of Industrial Information Integration, Volume 41, 2024, 100658, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100658>.
- Max Wuennenberg, Benjamin Wegerich, Johannes Fottner, Towards Data Management and Data Science for Internal Logistics Systems using Process Mining and Discrete-Event Simulation, Procedia CIRP, Volume 120, 2023, Pages 852–857, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.087>.
- Yanghua Pan, Ray Y. Zhong, Ting Qu, Liqiang Ding, Jun Zhang, Multi-level digital twin-driven kitting-synchronized optimization for production logistics system, International Journal of Production Economics, Volume 271, 2024, 109176, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109176>.
- N. Prinzezis, C.T. Kiranoudis, An internet-based logistics management system for enterprise chains, Journal of Food Engineering, Volume 70, Issue 3, 2005, Pages 373–381, ISSN 0260-8774, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.040>.

15. Ali Allahverdi, A survey of scheduling problems with no-wait in process, *European Journal of Operational Research*, Volume 255, Issue 3, 2016, Pages 665–686, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.036>.
16. Sajede Aminzadegan, Mohammad Tamannaeei, Majid Fazeli, An integrated production and transportation scheduling problem with order acceptance and resource allocation decisions, *Applied Soft Computing*, Volume 112, 2021, 107770, ISSN 1568–4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107770>.
17. Ali Gharaei, Fariborz Jolai, A multi-agent approach to the integrated production scheduling and distribution problem in multi-factory supply chain, *Applied Soft Computing*, Volume 65, 2018, Pages 577–589, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.002>.
18. Bard, Jonathan & Nananukul, Narameth. (2010). A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. *Computers & Operations Research*. 37. 2202–2217. 10.1016/j.cor.2010.03.010.

---

© Хрусталева Ирина Николаевна (irina.khrustaleva@mail.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»