

УДК 004.89+007.52+681.518+65.011.56
DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.047](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.047)

Миварная система принятия решений по оптимизационному распределению грузов для групп складских роботов

Ш. Гун✉

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация*

Резюме. В статье предлагается интеллектуальная миварная система принятия решений (МСРП), предназначенная для оптимизационного распределения и перевозки грузов группами складских роботов. Данная МСРП объединяет три группы разных складских роботов: робота-погрузчика (РП), робота-транспортировщика (РТ) и робота-разгрузчика (РР). Выбор и определение состояния каждого робота (робота-погрузчика, робота-транспортировщика и робота-разгрузчика) основывается на соответствующих расчетах, которые выполняются с использованием специально разработанных алгоритмов. Эти алгоритмы основаны на ряде ключевых систем уравнений, таких как система уравнений робота-транспортировщика, система уравнений робота-погрузчика, система уравнений робота-разгрузчика и система переменных команды. В системе уравнений учитываются состояние робота, работоспособность робота, способность завершения перевозки груза, совместимость с перевозкой груза и т.д. Кроме того, учитывается манхэттенское расстояние, что позволяет определить способность робота завершить задачу. В статье представлено детальное описание систем уравнений и алгоритма расчета, а также формализованное описание предметной области, в которой функционирует миварная система логического искусственного интеллекта. Также изложена логическая принципиальная схема МСРП и правила принятия решений, которые помогут в выборе роботов, что делает систему более эффективной. Экспериментальные результаты показывают, что данная система может функционировать нормально в соответствии с заранее установленной логикой и целями. Она точно выполнила все задачи распределения, продемонстрировав хорошую стабильность и надежность.

Ключевые слова: мивар, миварные системы принятия решений, логический ИИ, распределительная система, группа складских роботов, робот-погрузчик, робот-транспортировщик, робот-разгрузчик.

Для цитирования: Гун Ш. Миварная система принятия решений по оптимизационному распределению грузов для групп складских роботов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2019> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.047

Mivar decision-making system for optimized cargo distribution for groups of warehouse robots

S. Gong✉

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. This article proposes an intelligent mivar decision-making system (MDMS) designed for the optimized distribution and transportation of cargo by groups of warehouse robots. This mivar decision-making system integrates three groups of different warehouse robots: the loader robot (RP), the transporter robot (RT), and the unloader robot (RR). The selection and determination of the state of each robot (loader robot, transporter robot, and unloader robot) are based on corresponding calculations performed using specially developed algorithms. These algorithms are based on a series of key equation systems, such as the transporter robot equation system, the loader robot equation system, the unloader robot equation system, and the command variable system. The equation systems take into account the robot's state, operational capability, ability to complete cargo transportation, compatibility for cargo transportation, etc.

Additionally, the Manhattan distance is considered, which helps determine the robot's ability to complete its task. The article provides a detailed description of the equation systems and calculation algorithms, as well as a formalized description of the domain in which the mivar logical artificial intelligence system operates. The logical schematic of the MDMS system and decision-making rules are also outlined, which aid in robot selection, making the system more efficient. Experimental results show that this system can function normally according to pre-established logic and objectives. It accurately completed all distribution tasks, demonstrating good stability and reliability.

Keywords: mivar, mivar decision-making systems, logical AI, distribution system, group of warehouse robots, robot-loader, robot-transporter, robot-unloader.

For citation: Gong S. Mivar decision-making system for optimized cargo distribution for groups of warehouse robots. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2019> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.047

Введение

По данным Statista, годовой темп роста маркетплейса в России составил 37 %, а общее количество заказов превысило 7 миллиардов. С быстрым ростом глобальных потребностей в логистике и цепочках поставок интеллектуальные складские системы стали ключевой технологией для повышения эффективности и снижения затрат. Складские системы Ozon, Amazon и JD Logistics имеют свои особенности в степени автоматизации, эффективности системного планирования и энергопотреблении, но также обладают общими недостатками. Ozon уделяет внимание региональной планировке, но имеет низкий уровень автоматизации и сильно зависит от ручного труда [1]; Amazon, представленный роботами Kiva, достиг высокой степени автоматизации, но сталкивается с высоким энергопотреблением и сложностью системы [2]; JD Logistics, с полностью автоматизированным складом «Asia No. 1» и внедрением зеленой энергии, все же сталкивается с проблемами высоких затрат на обслуживание и энергопотребления [3]. Все три системы сталкиваются с узкими местами в эффективности планирования в пиковые периоды и высокой зависимостью от ручного труда. Направления улучшений включают повышение энергоэффективности, оптимизацию алгоритмов планирования, снижение затрат на обслуживание и усиление взаимодействия человека и машины.

В последние годы интеграция миварных технологий логического искусственного интеллекта (ИИ), централизованных систем управления и робототехники предоставила новые идеи и решения для развития интеллектуальных складских систем [4]. Миварная система – это технология ИИ, основанная на логической структуре, которая значительно повышает способность роботов принимать решения и выполнять задачи в сложных условиях. Система MIPRA, основанная на миварной технологии, продемонстрировала превосходные результаты в планировании действий роботов [5], особенно в решении задач типа STRIPS в динамической среде, что показало эффективность миварной системы в реальных приложениях робототехники. В складской среде миварные технологии могут оптимизировать процесс принятия решений через логические правила и модели баз знаний, например, использование экспертных систем для диагностики ремонтных проблем [6] и принятия оптимальных решений [7]; также могут быть использованы для реализации автономного планирования маршрутов [8] и избегания препятствий роботами [9] в двумерном и трехмерном логическом пространстве [10].

Централизованные системы управления роботами достигают глобальной оптимизации за счет унифицированного управления и планирования складских ресурсов. В сочетании с миварными технологиями логического ИИ [11] централизованные системы управления могут более точно распределять задачи, отслеживать состояние оборудования и координировать взаимодействие нескольких роботов. В крупных складских центрах централизованные системы управления могут анализировать данные о запасах в реальном времени [12], динамически корректировать задачи сортировки роботов [13], тем самым

сокращая время ожидания и потери ресурсов. Применение робототехники на складах расширилось от простой транспортировки грузов до выполнения сложных задач [14]. Таким образом, роботы могут более интеллектуально воспринимать окружающую среду [15], планировать маршруты [16] и выполнять высокоточные операции. Например, автономные навигационные роботы могут избегать препятствий в динамической среде [17], а роботы с двумя манипуляторами [18] могут выполнять сложные задачи упаковки грузов, повышая эффективность и безопасность складских операций [19].

В данной статье обобщено текущее состояние применения этих технологий в интеллектуальных складских системах, а также предложена миварная интеллектуальная распределительная система принятия решений и обработки информации (МСПР) для складской логистики, объединяющая робота-погрузчика (РП-РР), робота-транспортировщика (РТ-РТ) и робота-разгрузчика (РР-РР). Эта система использует миварные технологии логического ИИ, достигая динамической оптимизации распределения задач и планирования через обработку информации в реальном времени внутри системы, тем самым сокращая время транспортировки и потребление энергии, а также изучая механизмы совместной работы нескольких роботов для повышения общей эффективности системы.

Материалы и методы

Определение математической модели МСПР. На площадке загрузки приходят грузы и здесь работает группа РП; на складе работает группа РР; а группа РТ принимает грузы с помощью РП, перевозит грузы на склад и с помощью РР складировать грузы. На складе находятся стеллажи и зарядные станции для РТ и РР. На Рисунке 1 показан принцип работы системы МСПР. По текущим параметрам система определяет совместимость роботов к грузу и назначает груз на соответствующие роботы, также выдает команду в виде переменных состояний.

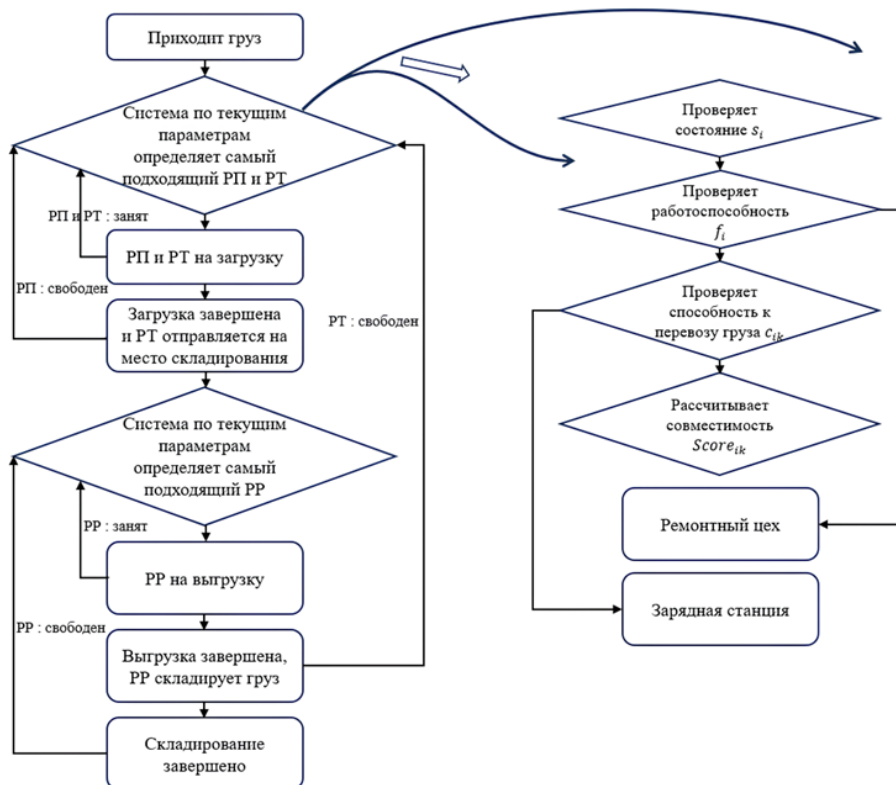


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы МСПР
Figure 1 – Schematic diagram of the MDMS

Поскольку интеллектуальная миварная система управляет тремя группами роботов с учетом списка текущих грузов, предлагаемая математическая модель МСПР состоит из четырех основных компонентов: системы уравнений робота-транспортровщика, системы уравнений робота-погрузчика, системы уравнений робота-разгрузчика и системы переменных команд. Каждая подсистема тщательно продумана, чтобы обеспечить бесперебойную координацию и динамическую оптимизацию всего рабочего процесса складирования. Далее мы подробно рассмотрим математические формулировки, алгоритмические реализации и экспериментальные проверки этой модели.

Целевая функция:

$$\max \sum_{t=0}^T \sum_{k=0}^K (\sum_{i=0}^I Score_{ik}(t)x_{ik}(t) + \sum_{j=0}^J Score_{jk}(t)x_{jk}(t) + \sum_{p=0}^P Score_{pk}(t)x_{pk}(t)).$$

Система уравнений робота-транспортровщика (РТ-RT).

Уравнение состояния RT_i :

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } \exists k x_{ik}(t) = 1, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, I\}.$$

Когда $s_i(t) = 0$, РТ занят; когда $s_i(t) = 1$, РТ свободен.

Уравнение работоспособности RT_i :

$$f_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } RT_i \text{ нужно ремонтировать,} \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

Способность RT_i к перевозу груза k :

$$c_{ik}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } E_i(t) > \frac{D_{ik}}{200} + 20, \\ 0, & \text{если } RT_i \text{ нужно зарядить.} \end{cases} \quad (3)$$

Общее манхэттенское расстояние RT_i для перевоза груза:

$$D_{ik} = d_{ik} + d_k + d_{k0}, \quad (4)$$

$$d_{ik} = |x_i - x_{sk}| + |y_i - y_{sk}|, \quad (5)$$

$$d_k = |x_{ek} - x_{sk}| + |y_{ek} - y_{sk}|, \quad (6)$$

$$d_{k0} = |x_0 - x_{ek}| + |y_0 - y_{ek}|. \quad (7)$$

Функция динамической совместимости RT_i и груза k :

$$Score_{ik}(t) = s_i(t)f_i(t)c_{ik}(t)\left(\frac{\alpha}{1+\sqrt{d_{ik}}} + \beta \frac{E_i(t)}{50}\right). \quad (8)$$

Переменная решения:

$$x_{ik}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } i^*, k^* = \operatorname{argmax}_k Score_{ik}(t), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (9)$$

Если в момент t у RT_i максимальная совместимость к грузу k , то RT_i назначается на груз k , и $x_{ik}(t) = 1$. Где (x_i, y_i) – местоположение RT_i ; (x_{sk}, y_{sk}) – местоположение загрузки; (x_{ek}, y_{ek}) – местоположение выгрузки; (x_0, y_0) – местоположение зарядной станции; $E_i \in [0, 100]$ – заряд батареи РТ; $\alpha + \beta = 1$ – весы.

Система уравнений робота-погрузчика (РП-РР).

Уравнение состояния RP_j :

$$s_j(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } \exists k x_{jk}(t) = 1, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, J\}.$$

Когда $s_j(t) = 0$, РП занят; когда $s_j(t) = 1$, РП свободен.

Уравнение работоспособности RP_j :

$$f_j(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } RP_j \text{ нужно ремонтировать,} \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

Функция динамической совместимости РП j и груза k :

$$Score_{jk}(t) = s_j(t)f_j(t) \frac{1}{1+\sqrt{d_{jk}}}. \quad (12)$$

Переменная решения:

$$x_{jk}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } j^*, k^* = \operatorname{argmax}_k Score_{jk}(t), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (13)$$

Если в момент t у RP_j максимальная совместимость к грузу k , то RP_j назначается на груз k , и $x_{jk}(t) = 1$.

Система уравнений робота-разгрузчика (PP-RR).

Уравнение состояния RR_p :

$$s_p(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } \exists k x_{pk}(t) = 1, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (14)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}.$$

Уравнение работоспособности RR_p :

$$f_p(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } RR_p \text{ нужно ремонтировать,} \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (15)$$

Способность RR_p к перевозу груза k :

$$c_{pk}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } E_p(t) > \frac{D_{pk}}{100} + 20, \\ 0, & \text{если } RR_p \text{ нужно зарядить.} \end{cases} \quad (16)$$

Общее манхэттенское расстояние RR_p для перевоза груза:

$$D_{pk} = d_{pk} + d_{k0}, \quad (17)$$

$$d_{pk} = |x_p - x_{ek}| + |y_p - y_{ek}|, \quad (18)$$

$$d_{k0} = |x_0 - x_{ek}| + |y_0 - y_{ek}|. \quad (19)$$

Функция динамической совместимости РР p и груза k :

$$Score_{pk}(t) = s_p(t)f_p(t)c_{pk}(t) \left(\frac{\alpha}{1+\sqrt{d_{pk}}} + \beta \frac{E_p(t)}{50} \right). \quad (20)$$

Переменная решения:

$$x_{pk}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } p^*, k^* = \operatorname{argmax}_k Score_{pk}(t), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (21)$$

Если в момент t у RR_p максимальная совместимость к грузу k , то RR_p назначается на груз, и $x_{pk}(t) = 1$. Где (x_p, y_p) – местоположение RR_p ; $E_p \in [0, 100]$ – заряд батареи РР.

Система переменных команды:

$$s_{fixed_j}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если груз закреплен в РТ,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (22)$$

$$s_{fixed_i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если груз закреплен в РП,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (23)$$

$$s_{delivery_i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если груз был доставлен РП,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (24)$$

$$s_{fixed_p}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если груз закреплен в РР,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (25)$$

$$s_{load}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если загрузка завершена,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (26)$$

$$s_{unload}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если разгрузка завершена,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (27)$$

$$s_{store}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если складирование завершено,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (28)$$

Логическая модель МСПР. Преобразуем математическую модель в логическую модель (миварный подход), которая описывается правилами в Таблице 1.

Таблица 1 – Правила миварного подхода
Table 1 – Rules of the mivar approach

Пра- вило	ЕСЛИ	ТО	ИНАЧЕ
1	Состояние РТ $s_i(t) = 1$	РТ i свободен	РТ i занят, $s_i(t) = 0$
2	Состояние РП $s_j(t) = 1$	РП j свободен	РП j занят, $s_j(t) = 0$
3	Работоспособность РТ $f_i(t) = 1$	РТ i не нужен ремонт	РТ i нужен ремонт, $f_i(t) = 0$
4	Работоспособность РП $f_j(t) = 1$	РП j не нужен ремонт	РП j нужен ремонт, $f_j(t) = 0$
5	Известны координаты РТ $x_i(t), y_i(t)$, положения загрузки x_{sk}, y_{sk} , положения выгрузки x_{ek}, y_{ek} , положения зарядной станции x_0, y_0	По группе формул: $D_{ik} = d_{ik} + d_k + d_{k0}$, $d_{ik} = x_i - x_{sk} + y_i - y_{sk} $, $d_k = x_{ek} - x_{sk} + y_{ek} - y_{sk} $, $d_{k0} = x_0 - x_{ek} + y_0 - y_{ek} $ можно получить общее расстояние маршрута РТ D_{ik}	Невозможно получить общее расстояние маршрута РТ D_{ik}
6	Заряд батареи E_i , общее расстояние маршрута РТ D_{ik} , и $E_i(t) > \frac{D_{ik}}{200} + 20$	Способность РТ i к перевозу груза k : $c_{ik}(t) = 1$. РТ i способен перевезти груз k , не нужна зарядка	$c_{ik}(t) = 0$, РТ i не способен перевезти груз k , нужна зарядка
7	Известны состояние РТ, работоспособность, способность к перевозу груза, заряд батареи $E_i(t)$ и манхэттенское расстояние от робота i до положения загрузки d_{ik}	По формуле $Score_{ik}(t) = s_i(t)f_i(t)c_{ik}(t)\left(\frac{\alpha}{1+\sqrt{d_{ik}}} + \beta\frac{E_i(t)}{50}\right)$ можно получить $Score_{ik}(t)$, общую совместимость РТ i к перевозке груза k	–
8	$i^*, k^* = \operatorname{argmax}_k Score_{ik}(t)$ для $\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, I\}$	$x_{i^*k^*}(t) = 1$, РТ i^* назначается на груз k^* в момент t	$x_{i^*k^*}(t) = 0$, РТ i^* не назначается на груз k^* в момент t

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

9	Известны координаты РП и положения загрузки $x_j(t), y_j(t), x_{sk}, y_{sk}$	По формуле $d_{jk} = x_j - x_{sk} + y_j - y_{sk} $ можно получить манхэттенское расстояние d_{jk}	-
10	Известны состояние РП, работоспособность и манхэттенское расстояние от загрузчика j до положения загрузки d_{jk}	По формуле $Score_{jk}(t) = \frac{1}{1 + \sqrt{d_{jk}}}$ $= s_j(t)f_j(t) \frac{1}{1 + \sqrt{d_{jk}}}$ можно получить $Score_{jk}(t)$	-
11	$j^*, k^* = \operatorname{argmax}_k Score_{jk}(t)$ для $\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, J\}$	$x_{j^*k^*}(t) = 1$, РП j^* назначается на груз k^* в момент t	$x_{j^*k^*}(t) = 0$, РП j^* не назначается на груз k^* в момент t
12	$x_{ik}(t) = x_{jk}(t) = 1$, то на груз k в момент t назначены РТ и РП	РТ и РП начинают двигаться к грузу и $s_i(t) = s_j(t) = 0$	Ждать, когда назначены РТ и РП
13	Новые координаты РТ, РП и груза равны: $x_i(t) = x_j(t) = x_{sk}, y_i(t) = y_j(t) = y_{sk}, s_i(t) = s_j(t) = 0$	РТ и РП приехали в место погрузки и готовы к погрузке, система выдает команду для начала загрузки: $s_{load} = 0$	РТ и РП на пути
14	$s_{load} = 0$, загрузка начата	РП фиксирует груз $s_{fixed,j} = 1$ и кладет груз на РТ	Загрузка не начата
15	$s_{fixed,j} = 1$ и РП положил груз на РТ	Зажимное устройство на РТ фиксирует груз $s_{fixed,i} = 1$	-
16	Зажимное устройство на РТ фиксирует груз $s_{fixed,i} = 1$	РП запускает груз $s_{fixed,j} = 0$	-
17	Зажимное устройство на РТ фиксирует груз $s_{fixed,i} = 1$ и РП запускает груз $s_{fixed,j} = 0$	Загрузка совершена: $s_{load} = 1$,	Загрузка идет
18	Загрузка совершена: $s_{load} = 1$	Состояние РП j изменяется с занят на свободен: $s_j(t) = 1$, РТ отправляется, $s_{delivery,i} = 0$.	Загрузка идет
19	Состояние РР $s_p(t) = 1$	РР p свободен	РР p занят, $s_p(t) = 0$
20	Работоспособность РР $f_p(t) = 1$	РР p не нужен ремонт	РР p нужен ремонт, $f_p(t) = 0$
21	Известны координаты РР $x_p(t), y_p(t)$, положения выгрузки x_{ek}, y_{ek} , положения зарядной станции x_0, y_0	По группе формул: $D_{pk} = d_{pk} + d_{k0}$, $d_{pk} = x_p - x_{ek} + y_p - y_{ek} $, $d_{k0} = x_0 - x_{ek} + y_0 - y_{ek} $ можно получить общее манхэттенское расстояние маршрута РР D_{pk}	Невозможно получить общее расстояние маршрута РР D_{ik}
22	Заряд батареи $E_p(t)$, общее расстояние маршрута РР D_{pk} , и $E_p(t) > \frac{D_{pk}}{100} + 20$	Способность РР p к выгрузке груза k : $c_{pk}(t) = 1$, РР p способен выгрузить груз k , не нужна зарядка	$c_{pk}(t) = 0$, РР p не способен выгрузить груз k , нужна зарядка
23	Известны состояние РР, заряд батареи $E_p(t)$, работоспособность, способность к перевозу груза, и манхэттенское расстояние от выгрузчика p до положения загрузки d_{pk}	По формуле $Score_{pk}(t) = s_p(t)f_p(t)c_{pk}(t) \left(\frac{\alpha}{1 + \sqrt{d_{pk}}} + \beta \frac{E_p(t)}{50} \right)$ можно получить $Score_{pk}(t)$	-

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

24	$p^*, k^* = \operatorname{argmax}_k \operatorname{Score}_{pk}(t)$ для $\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$	$x_{p^*k^*}(t) = 1$, РР p^* назначается на груз k^* в момент t	$x_{p^*k^*}(t) = 0$, РР p^* не назначается на груз k^* в момент t
25	$x_{pk}(t) = 1$ то РР p^* назначается на груз k^*	РР начинает двигаться к грузу и $s_p(t) = 0$	Ждать, когда назначен РР
26	Координаты РТ и места складирования груза равны: $x_i(t) = x_{ek}, y_i(t) = y_{ek}$	РТ приехал и готов к выгрузке: $s_{\text{delivery}_i} = 1$. Система проверяет координаты РР.	РТ на пути
27	Координаты РР и места складирования груза равны: $x_p(t) = x_{ek}, y_p(t) = y_{ek}$	РР приехал и готов к выгрузке. Система проверяет координаты РТ.	РР на пути
28	РР и РТ оба приехали и готовы к выгрузке: $s_{\text{delivery}_i} = 1, x_p(t) = x_{ek}, y_p(t) = y_{ek}$	Система выдает команду для начала выгрузки: $s_{\text{unload}} = 0$	РР или РТ не готов к выгрузке
29	Система выдает команду для начала выгрузки: $s_{\text{unload}} = 0$	РР фиксирует груз $s_{\text{fixed}_p} = 1$	Ждать команду от системы
30	РР фиксирует груз $s_{\text{fixed}_p} = 1$	Зажимное устройство на РР запускает груз $s_{\text{fixed}_i} = 0$	Ждать, когда $s_{\text{fixed}_p} = 1$
31	Зажимное устройство на РР запускает груз $s_{\text{fixed}_i} = 0$ и РР фиксирует груз $s_{\text{fixed}_p} = 1$	РТ дает систему обратную связь: выгрузка завершена $s_{\text{unload}} = 1$, состояние РТ изменяется на свободен $s_i(t) = 1$ и РР начинает класть груз в указанное место стеллажа $\text{storey}_0: s_{\text{store}} = 0$	Выгрузка не завершена $s_{\text{unload}} = 0$
32	Место нахождения груза одинаково с местом хранения: $\text{storey}_k(t) = \text{storey}_0$	РР запускает груз $s_{\text{fixed}_p} = 0$	Ждать, когда РР положит груз в правильное место хранения
33	РР запускает груз $s_{\text{fixed}_p} = 0$	РР дает систему обратную связь: груз находится в указанном месте стеллажа. Сохранение выполнено $s_{\text{store}} = 1$	Сохранение не выполнено $s_{\text{store}} = 0$
34	Сохранение выполнено $s_{\text{store}} = 1$	Состояние РР изменяется на свободен $s_p(t) = 1$	–

Сценарий описывается таким образом:

1. По очереди для каждого груза система делает расчеты по текущим параметрам и назначает самые подходящие РТ и РР.
2. По команде системы РТ и РР перемещаются на место загрузки, соответственно их состояние меняется с «свободен» на «занят».
3. Когда РТ и РР приехали на место загрузки, система отправляет команду на загрузку, РР загружает груз на РТ. Когда фиксирующее устройство на РТ фиксирует груз и РР отпускает груз, РТ отправляет системе обратную связь: загрузка завершена. Далее состояние РР меняется с «занят» на «свободен», а РТ отправляется на место складирования груза.
4. Когда РТ отправился на место складирования, система сразу делает расчеты и выбирает самый подходящий РР и командует этот РР перемещаться на место складирования груза, состояние РР меняется с «свободен» на «занят».
5. Когда РТ и РР оба приехали на место складирования, система отправляет команду на разгрузку, фиксирующее устройство на РТ отпускает груз, РР фиксирует груз

и разгружает его, после этого РТ отправляет системе обратную связь: разгрузка завершена, состояние РТ меняется на «свободен».

6. РР размещает груз на указанное место на стеллаже, после завершения складирования РР отправляет системе обратную связь: складирование завершено; состояние РР меняется на «свободен».

Результаты и обсуждение

Практическая реализация и экспериментальная проверка системы. Ниже представлено тестирование системы в КЭСМИ (конструктор экспертных систем миварный) со следующими входными параметрами: параметры груза; параметры робота-погрузчика; параметры робота-разгрузчика; и параметры робота-транспортровщика. На выходе система выводит состояние роботов, способность завершения перевозки, а также значения параметров, участвующих в расчете. В Таблице 2 показаны входные параметры, которые вводятся пользователем и выходные параметры, которые вычисляются согласно вышеописанным правилам.

Таблица 2 – Входные параметры текущего времени

Table 2 – Current-time input parameters

Супер-параметр	Кол-во грузов	Кол-во РТ	Кол-во РП	Кол-во РР	Зарядная станция
–	K = 1	I = 3	J = 3	P = 3	$(x_0, y_0) = (300, 300)$
Груз	Абсцисса места загрузки	Ордината места загрузки	Абсцисса места разгрузки	Ордината места разгрузки	Место складирования в стеллаже
1	25	30	275	310	3
РТ	Заряд батареи	Состояние	Работоспособность	Абсцисса местоположения	Ордината местоположения
1	25	1	1	458	678
2	63	1	1	256	342
3	95	1	1	357	177
РП	–	Состояние	Работоспособность	Абсцисса местоположения	Ордината местоположения
1	–	1	1	33	42
2	–	0	1	25	19
3	–	1	1	7	11
РР	Заряд батареи	Состояние	Работоспособность	Абсцисса местоположения	Ордината местоположения
1	87	1	1	732	430
2	55	1	0	235	195
3	34	1	1	354	256

После ввода входных параметров в модель в КЭСМИ на выходе были получены результаты, которые представлены на Рисунках 2 и 3:

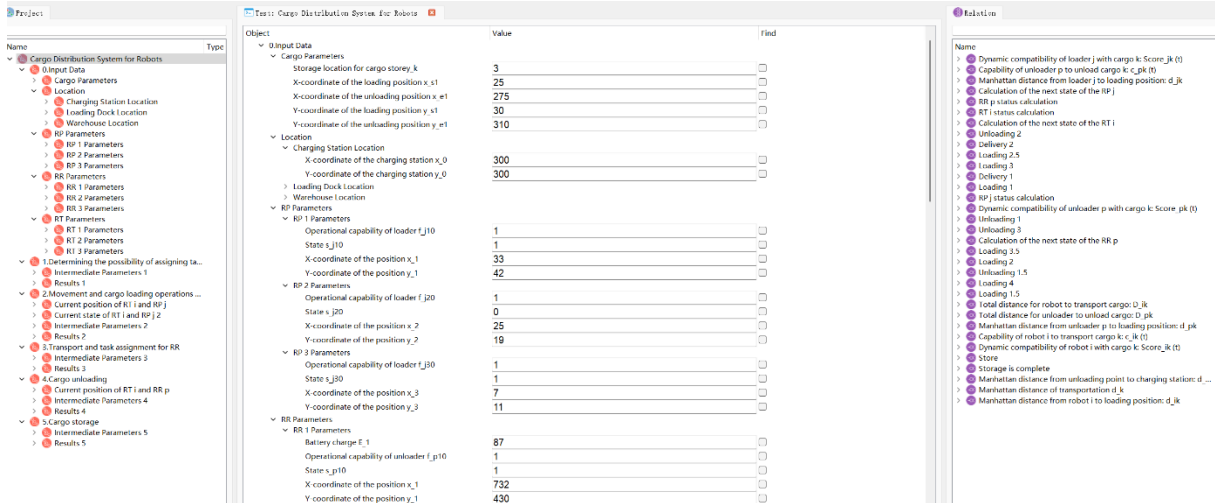


Рисунок 2 – Рабочее окно системы в КЭСМИ
 Figure 2 – System interface in KESMI

Специально были установлены разные ситуации: есть занятый РП 2; РТ 1, у которого не хватает заряда батареи; сломанный РР 2, которому нужен ремонт. Результаты показывают, что система не только может выбрать самые подходящие роботы из групп роботов по алгоритму, но и может по текущим параметрам определить работоспособность, способность робота к перевозу груза и сообщить пользователю через подсказки на экране.

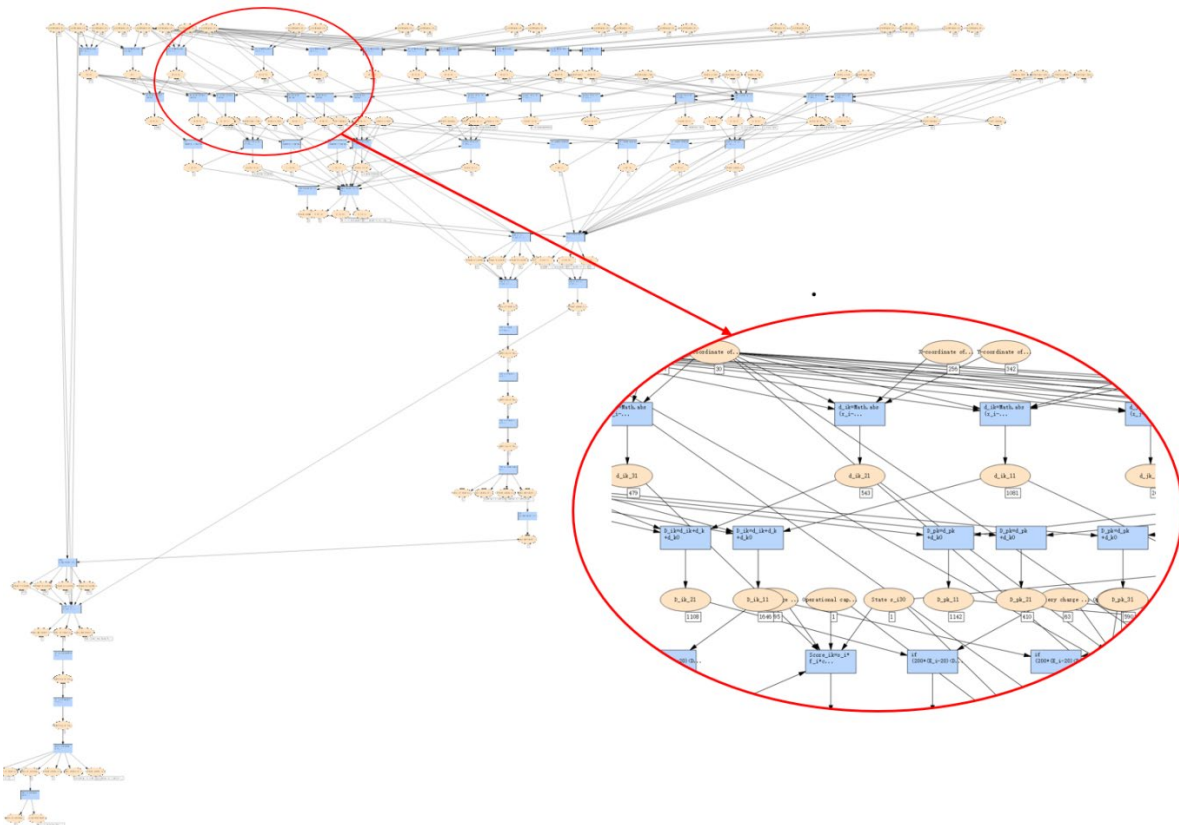


Рисунок 3 – Граф решения
 Figure 3 – Decision graph

Описание полученного решения и его обоснование состоит из 52 шагов, рассмотрим два из них:

Step # 0

Relation: Manhattan distance from unloading point to charging station: d_k0

Rule description: d_10

Input parameters:

Y-coordinate of the unloading position y_e1 =310;

X-coordinate of the unloading position x_e1 =275;

X-coordinate of the charging station x_0 =300;

Y-coordinate of the charging station y_0 =300;

Formula:

$d_{k0} = \text{Math.abs}(x_0 - x_{ek}) + \text{Math.abs}(y_0 - y_{ek})$

Results: d_10=35;

Step # 45

Relation: Calculation of the next state of the RR p

Rule description: Calculation of the next state of the RR p

Input parameters:

x_pk_21=RR 2 needs to be repaired.;

x_pk_11=RR 1 is assigned to load 1.;

x_pk_31=0;

Formula:

var x_pk_11, x_pk_21, x_pk_31, s_p1

if (x_pk_11 == 'RR 1 is assigned to load 1.' || x_pk_21 == 'RR 2 is assigned to load 1.'
|| x_pk_31 == 'RR 3 is assigned to load 1.'){

s_p1 = 0}

Results: Current state of RR p s_p*1=0.

Заключение

В данной работе предложена интеллектуальная система для ситуации: на площадке загрузки и складе работает три группы складских роботов: работа-транспортровщика, работа-погрузчика и работа-разгрузчика, и они должны совместно перевезти груз из места загрузки до места складирования. Научная новизна данной работы заключается в разработке моделей описания, методов принятия решений и математического обеспечения, которые позволяют оптимальным образом распределить грузы для групп складских роботов. Эти роботы могут совместно работать под управлением системы для завершения приема, передачи и хранения грузов без участия человека.

Математическая модель и описание миварного подхода подробно изложены, на основе этого система реализована в КЭСМИ и проведены эксперименты. В результате экспериментальной проверки установленной системы распределения было подтверждено, что она функционирует в строгом соответствии с заранее заданной логикой и поставленными целями. Система продемонстрировала высокую точность выполнения распределительных задач, а также отличную стабильность и надежность в процессе работы.

Таким образом, обоснована эффективность интеграции экспертной системы, построенной на основе миварного подхода, с системой управления роботами для решения задач динамического распределения грузов складскими роботами. Синергия миварной технологии логического интеллекта и систем управления роботами

обеспечивает динамическую оптимизацию процессов распределения задач и планирования за счет обработки информации в реальном времени. Это, в свою очередь, способствует сокращению времени транспортировки, снижению энергопотребления, а также позволяет изучать механизмы координации совместной работы множества роботов с целью повышения общей эффективности функционирования системы.

В дальнейшем на основе текущей работы можно решить более сложные задачи, например, два или сколько роботов совместно перевозят один большой груз, один робот перевозит несколько маленьких грузов одновременно, можно даже разработать систему для группы гибридных роботов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Binos T., Adamopoulos A., Bruno V. Decision Support Research in Warehousing and Distribution: A Systematic Literature Review. *International Journal of Information Technology and Decision Making*. 2020;19(3):653–693. <https://doi.org/10.1142/S0219622020300013>
2. Li Zh., Barenji A.V., Jiang J., Zhong R.Y., Xu G. A Mechanism for Scheduling Multi Robot Intelligent Warehouse System Face with Dynamic Demand. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020;31(2):469–480. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1459-y>
3. Tubis A.A., Rohman Ju. Intelligent Warehouse in Industry 4.0–Systematic Literature Review. *Sensors*. 2023;23(8). <https://doi.org/10.3390/s23084105>
4. Гун Ш. Миварная система принятия решений для распределения и перевозки грузов командой складских роботов. *Системы управления и информационные технологии*. 2025;(2):23–29.
Gong S. Mivar Decision-Making System for Distribution and Transportation of Cargo by a Team of Warehouse Robots. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2025;(2):23–29. (In Russ.).
5. Варламов О.О. *Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство*. Москва: Радио и связь; 2002. 286 с.
6. Антонова А.А., Варламов О.О. Миварная экспертная система для поддержки принятия решений персонала на производстве планетарных редукторов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.042>
Antonova A.A., Varlamov O.O. Mivar Expert System for Supporting Personnel Decision-Making in the Production of Planetary Gearboxes. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.042>
7. Подопрigorova Н.С., Козырев С.А., Подопрigorova С.С. и др. Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024;(4):126–138. <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2024-4-126-138>
Podoprigorova N.S., Kozyrev S.A., Podoprigorova S.S., et al. Development of a Mivar Expert System for Selecting a Consensus Algorithm for Distributed Lists. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024;(4):126–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2024-4-126-138>
8. Коценко А.А. Разработка методики создания миварной СПР для планирования маршрутов роботов в трехмерном логическом пространстве. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2023;(15):301–304.

- Kotsenko A.A. Development of a Method for Creating a Mivar Decision-Making System for Planning Robot Routes in a Three-Dimensional Logical Space. *Informatsiya i obrazovanie: granitsy kommunikatsii*. 2023;(15):301–304. (In Russ.).
9. Шэнь Ц., Гун Ш., Варламов О.О., Адамова Л.Е., Баленко Е.Г. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024;(4):164–176. <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2024-4-164-176>
Shen Q., Gong Sh., Varlamov O.O., Adamova L.E., Balenko E.G. Dynamic Robot Path Planning Based on Semantic Object Detection Using Mivar Expert System. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024;(4):164–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2024-4-164-176>
 10. Kotsenko A., Andreev A., Kim R., et al. Route Planning of Autonomous Robots in Three-Dimensional Logic Space Using Mivar Technologies. In: *E3S Web of Conferences: Volume 515 (2024): International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2024) "Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution", 08–10 April 2024, Rostov-on-Don, Russia*. EDP Sciences; 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451504018>
 11. Aladin D.V., Aladina E.V., Chuvikov D.A., Varlamov O.O., Adamova L.E. Creating a "Logical Intelligent Plant Care System" in Digital Agriculture Based on Mivar Approach. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2021 International Conference on World Technological Trends in Agribusiness (WTTA 2021), 29–30 March 2021, Omsk, Russia*. IOP Publishing; 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012004>
 12. Ann Mathews R., Aleena Kv A.Kv., Abhilash A., Dev Nand D D.N.D., Devarajan K. Survey on Warehouse Monitoring and Management Using AI. *International Journal of Advances in Engineering and Management*. 2024;6(11):391–397.
 13. Болучевская О.А., Милошенко О.В. Вопросы современного применения роботов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2013;(3). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2014/01/Boluchevskaya_Miloshenko_3_13_1.pdf
Boluchevskaya O.A., Miloshenko O.V. Contemporary Issues of Robots. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2013;(3). (In Russ.). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2014/01/Boluchevskaya_Miloshenko_3_13_1.pdf
 14. Fang Yu., De Koster R., Roy D., Yu Yu. Dynamic Robot Routing and Destination Assignment Policies for Robotic Sorting Systems. *Transportation Science*. 2025;59(3):451–687. <https://doi.org/10.1287/trsc.2023.0458>
 15. Хан М.Х., Якунин А.Н. Обнаружение и отслеживание объектов при движении мобильного робота с использованием обработки изображений. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.027>
Han M.H., Yakunin A.N. Object Detection and Tracking When Constructing Mobile Robot Motion Trajectory Using Image Processing. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.027>
 16. Лукин Д.С., Косенко Е.Ю. Нейросетевой метод планирования пути в двумерном пространстве. *Системы анализа и обработки данных*. 2023;(4):55–68. <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2023-4-55-68>

- Lukin D.S., Kosenko E.Yu. A Neural Network Method for Path Planning in a Two-Dimensional Space. *Analysis and Data Processing Systems*. 2023;(4):55–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2023-4-55-68>
17. Лавлинская О.Ю., Берников В.В., Григорова О.Н. Распараллеливание вычислений поиска кратчайшего пути на основе технологии OpenMP. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.004>
Lavlinskaya O.Y., Bernikov V.V., Grigorova O.N. OpenMP Parallel Calculations in Algorithms for Solving Shortest Paths Problem. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.004>
18. Исанькин М.А., Маликов А.И. Синтез управления по состоянию наблюдателя робота манипулятора с двумя звеньями с нежестким соединением. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2016;72(3):112–121.
Isankin M.A., Malikov A.I. The Control and State Observer Design for Two Links Robot-Manipulator With Non Rigid Connection. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2016;72(3):112–121. (In Russ.).
19. Преображенский А.П. Характеристики информационной системы складского помещения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2016;(3). (На англ.). https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/Preobrazhensky_3_16_1.pdf
Preobrazhenskiy A.P. The Characteristics of the Information System of Warehouse Facilities. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2016;(3). https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/Preobrazhensky_3_16_1.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гун Шэншо, аспирант, Московский **Gong Shengshuo**, Postgraduate, Bauman государственный технический университет Moscow State Technical University, Moscow, им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская the Russian Federation. Федерация.

e-mail: hiteyeb@163.com

ORCID: [0000-0001-6177-7989](https://orcid.org/0000-0001-6177-7989)

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 20.08.2025; принята к публикации 03.09.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 20.08.2025; accepted for publication 03.09.2025.