(12). Zikrillaev N.F., Tursunov O.B., Kushiyev G.A. Development and Creation of a New Class of Graded-Gap Structures Based on Silicon with the Participation of Zn and Se Atoms. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2023, vol. 59, № 5, p. 670–673.

Inomova Ozodaxon Shavkatjon qizi (Namangan davlat universiteti talabasi;
https://orcid.org/0009-0007-1580-9178; e-mail: shavkatjonovna0217@gmail.com)

OMBORXONA LOGISTIKASIDA KO‘P ROBOTLI TIZIMLARNI TRANSPORT MASALASINI DINAMIK VAQT CHEKLOVLARI OSTIDA MODELLASHTIRISH

Annotatsiya. *Ushbu maqolada omborxona logistikasida ko‘p robotli tizimlarda vazifalarni taqsimlash masalasi transport masalasi asosida matematik modellashtirilgan. Modelda robotlar va vazifalar o‘rtasidagi moslik xarajatlar matritsasi orqali ifodalanib, vazifalarning bajarilishida vaqt cheklovlari (deadline va kechikish jarimalari) hisobga olingan. Taklif etilgan yondashuvda klassik transport modeli kengaytirilib, unga vaqtga bog‘liq cheklovlar va kechikish funksiyasi kiritilgan. Bu esa real omborxona sharoitida buyurtmalarni o‘z vaqtida bajarish va resurslardan samarali foydalanish imkonini beradi.*

Kalit so‘zlar: *omborxona logistikasi, ko‘p robotli tizimlar, shimoli-g‘arbiy burchak usuli, minimal elementlar usuli, potensiallar usuli, dinamik vaqt cheklovlari, kechikish jarimasi.*

Иномова Озодахон Шавкатжон кизи (студентка Наманганского государственного университета;
https://orcid.org/0009-0007-1580-9178; e-маил: shavkatjonovna0217@gmail.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОРОБОТНЫХ СИСТЕМ В СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ

Аннотация. *В данной статье рассматривается математическая модель распределения задач в многороботных системах складской логистики на основе транспортной задачи. В предложенной модели соответствие между роботами и задачами представлено в виде матрицы затрат, а также учитываются временные ограничения (дедлайны и штрафы за задержку) при выполнении задач. Предложенный подход расширяет классическую транспортную модель за счёт введения временно-зависимых ограничений и функции штрафа за задержку. Это позволяет эффективно использовать ресурсы и обеспечивать своевременное выполнение заказов в реальных условиях складской логистики.*

Ключевые слова: *складская логистика, многороботные системы, метод северо-западного угла, метод минимального элемента, метод потенциалов, динамические временные ограничения, штраф за задержку.*

Inomova Ozodaxon Shavkatjon qizi (Student of Namangan state university;
https://orcid.org/0009-0007-1580-9178; e-mail: shavkatjonovna0217@gmail.com)

MODELING OF MULTI-ROBOT SYSTEMS IN WAREHOUSE LOGISTICS UNDER DYNAMIC TIME CONSTRAINTS OF THE TRANSPORTATION PROBLEM

Annotation. *This article presents a mathematical model of task allocation in multi-robot systems in warehouse logistics based on the transportation problem. In the proposed model, the correspondence between robots and tasks is represented using a cost matrix, and time constraints (deadlines and delay penalties) in task execution are taken into account. The proposed approach extends the classical transportation model by incorporating time-dependent constraints and a delay penalty function. This enables efficient utilization of resources and timely completion of orders in real warehouse environments.*

Keywords: *warehouse logistics, multi-robot systems, northwest corner method, least cost method, potential method, dynamic time constraints, delay penalty.*

Kirish. Zamonaviy omborxona logistikasida avtomatlashtirilgan tizimlarning samaradorligi to‘g‘ridan to‘g‘ri ko‘p agentli tizimlarning (Multi-Agent Systems) muvofiqlashtirilgan ishlashiga bog‘liq [1]. So‘nggi yillarda omborxona jarayonlarini avtomatlashtirish, ayniqsa robotlashtirilgan transport tizimlarini integratsiya qilish ishlab chiqarish unumdorligini oshirishning asosiy omiliga aylandi [4]. Biroq, dinamik o‘zgarib turuvchi muhitda robotlarning vaqt cheklovlari (Time Windows) ostida ishlashi logistika tizimlarining yuqori darajada moslashuvchanligini taqozo etadi [3].

Mavjud tadqiqotlar ko‘p agentli yo‘l qidirish (MAPF) muammolarini hal qilishda sezilarli yutuqlarga erishgan bo‘lsa-da [2], vaqt omilini aksariyat hollarda qat’iy cheklov (Hard Constraint) sifatida qarashadi. Bu yondashuv dinamik vaziyatlarda tizimning “yechim topa olmaslik” (infeasibility) holatiga tushib qolishiga olib keladi [5]. Hozircha vaqt cheklovlarini operatsion xarajatlar tarkibiga kiritib, uni dinamik jarima funksiyasi orqali optimallashtirish masalasi yetarlicha yoritilmagan. Shu bois ushbu tadqiqotning maqsadi

– dinamik vaqt cheklovlari ostida robotlarning samaradorligini ta'minlovchi yangi matematik maqsad funksiyasini ishlab chiqishdir. Tadqiqot doirasida vaqt kechikishi va xarajat o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aks ettiruvchi modelni shakllantirish hamda robotlarning dinamik muhitda ustuvorliklarini aniqlashda jarima funksiyasining rolini baholash vazifalari belgilandi. Ushbu ish doirasida "Ko'p agentli omborxona tizimlarida vaqt cheklovlarini qat'iy cheklov o'rniga maqsad funksiyasining tarkibiy qismi sifatida kiritish, tizimning umumiy logistika samaradorligiga qanday ta'sir ko'rsatadi?" degan tadqiqot savoliga javob izlanadi. Ushbu maqolaning ilmiy yangiligi shundaki, biz vaqt omilini tizimning statik cheklovi emas, balki dinamik xarajat o'zgaruvchisi sifatida taqdim etuvchi yangi maqsad funksiyasi formulasini taklif qilamiz. Bu yondashuv tizimga murakkab sharoitlarda ham optimal yechim topish va robotlarning bo'sh turish vaqtini kamaytirish imkonini beradi.

Adabiyotlar tahlili. Omborxona logistikasida avtomatlashtirilgan tizimlarning samaradorligini oshirish bo'yicha Fragapane va boshqalar [1] o'z tadqiqotlarida ichki transport tizimlari va avtomatlashtirilgan saqlash hamda qidirish tizimlarini (AS/RS) integratsiya qilish omborxona unumdorligini tubdan oshirishini ko'rsatib berishgan. Mualliflar tizimlarning o'zaro bog'liqligi logistika xarajatlarini kamaytirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega ekanligini ta'kidlaydilar. Shu bilan birga, Wang va uning hamkasblari [3] aqlli omborxonalarda vazifalarni dinamik taqsimlash va yo'l rejalashtirishning murakkabligiga e'tibor qaratishadi. Ularning fikricha, dinamik muhitda robotlarning vazifalarini rejalashtirish statik modellarga qaraganda yuqori samaradorlik va moslashuvchanlikni talab qiladi. Vaqt cheklovlari (Time Windows) ostida robotlar harakatini rejalashtirish masalasi Zhang va boshqalar [4] tomonidan dinamik muhitlar misolida chuqur o'rganilgan. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, an'anaviy qat'iy cheklovlar dinamik muhitdagi kutilmagan vaziyatlarda tizimning barqarorligini pasaytirishi mumkin. Shu nuqtayi nazardan, Chen va Li [5] o'zlarining so'nggi tadqiqotlarida omborxona robotlari uchun ko'p maqsadli optimallashtirish (multi-objective optimization) tendensiyalarini tahlil qilganlar. Ular robotlarning energiya sarfi, vaqt samaradorligi va xarajatlarni muvozanatlashda yangi yondashuvlar zarurligini ta'kidlab, dinamik vaqt cheklovlarini optimallashtirish masalalarini kelajakdagi muhim tadqiqot yo'nalishi sifatida belgilashgan. Mavjud adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, aksariyat tadqiqotlar logistik operatsiyalarni optimal-lashtirishga qaratilgan bo'lsa-da, vaqt omilini jarima funksiyasi orqali maqsad funksiyasining tarkibiy qis-miga aylantirish hali to'liq hal etilmagan masala hisoblanadi.

Metodologiya. 3.1. Matematik modellashtirish. Ko'p robotli tizimlarda transport masalasini dinamik vaqt ostida optimallashtirish uchun biz an'anaviy transport modelini jarima funksiyasi bilan kengaytiramiz. Taklif etilayotgan maqsad funksiyasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(c_{ij} \cdot x_{ij}) + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(\lambda \cdot \max\left(0, \left| t_{ij} - d_{ij} \right|\right) x_{ij}\right).$$

Bu yerda:

- $c_{ij} - A_i$ punktdan B_j punktga yetkazishning asosiy xarajati;
- x_{ij} – yetkazilayotgan mahsulot miqdori;
- t_{ij} – robotning A_i punktdan B_j punktga yetib borish vaqti;
- d_{ij} – chegaralangan (belgilangan) muddat;
- λ – belgilangan vaqtdan kech qolsa jarima koeffitsiyenti;
- $R_i - A_i$ punktga biriktirilgan robot.

3.2. Algoritmik yondashuv. Masalani yechish uchun, dastlab, Shimoli-g'arbiy burchak yoki minimal elementlar usullari orqali boshlang'ich reja tuziladi [6]. So'ngra potensiallar usuli yordamida jarima omillari inobatga olingan holda optimal yechim izlanadi.

Ushbu tadqiqotda omborxona logistikasida ko'p robotli tizimlar (Multi-Agent Systems) uchun dinamik vaqt cheklovlari ostida optimallashtirish muammosini yechishga qaratilgan yangi matematik model taklif etiladi. Modelning asosiy yondashuvi – vaqt omilini qat'iy cheklov (Hard Constraint) sifatida emas, balki maqsad funksiyasining tarkibiy qismi bo'lgan dinamik jarima funksiyasi (Penalty Function) sifatida shakllantirishdan iborat. Xulosa qilib aytganda, taklif etilgan maqsad funksiyasi vaqt cheklovlari va xarajatlar o'rtasidagi muvozanatni ta'minlash orqali omborxona robotlarining umumiy unumdorligini oshirishda samarali yechim bo'lib xizmat qiladi.

Natijalar. Ushbu tadqiqotda taklif etilgan maqsadli funksiyaning samaradorligi robotlarning transport jadvalini shakllantirish jarayonida sinovdan o'tkazildi. Olingan natijalar modelning nazariy va amaliy afzalliklarini quyidagi jihatlarda isbotlaydi:

Taklif etilgan model transport xarajatlari va yetkazib berish vaqti omillarini yagona maqsadli funksiyada birlashtirish imkonini berdi. Avvalgi usullardan farqli o‘laroq, bizning yondashuvimiz belgilangan deadlinelarni tizimning ajralmas qismi sifatida qabul qiladi. Bu esa robotlarning harakatlanish yo‘nalishini optimallashtirishda ikki tomonlama samaradorlikka erishishga olib keldi: eng arzon yo‘llarni tanlash bilan bir qatorda, tizim ortiqcha vaqt sarfini (jarimalarni) ham minimallashtiradi. Deadlinelarga amal qilish ko‘rsatkichi oshadi, chunki jarima funksiyasi robotlarni belgilangan vaqt doirasida ishlashga rag‘batlantiradi.

Taklif etilgan formula robotlarning ish unumdorligini pasaytirmagan holda, omborxonadagi resurslar taqsimotini maqbullashtiradi. Xulosa qilish mumkinki, xarajat va vaqt omillarining integratsiyasi nafaqat transport masalasini yechishda, balki ko‘p agentli (multi-agent) tizimlarni boshqarishda ham yuqori natijalar beradi.

Muhokama. Olingan natijalar shuni tasdiqlaydiki, dinamik vaqt cheklovlari ostida robotlar logistikasini modellashtirishda jarima funksiyasi yondashuvi qat’iy cheklovli modellarga qaraganda ancha yuqori moslashuvchanlikni ta’minlaydi. Bizning tadqiqotimiz ushbu integratsiyani matematik jihatdan yanada chuqurlashtirib, robotlarning real vaqt rejimida qabul qiladigan qarorlariga iqtisodiy (xarajat-vaqt muvozanati) tus berdi.

Shuni alohida ta’kidlash joizki, ushbu model hozirgi bosqichda nazariy xarakterga ega. Kelgusidagi tadqiqotlarda ushbu matematik formulani yechish uchun enetik algoritmlar (Genetic Algorithms) yoki Mustahkamlovchi o‘qitish (Reinforcement Learning) usullarini qo‘llash orqali real vaqt rejimida yechim ishlab chiqish rejalashtirilmoqda. Shuningdek, modelni juda katta hajmdagi (1000+ robot) omborxonalarda sinab ko‘rish orqali uning miqyoslanish imkoniyatlarini tekshirish maqsadga muvofiqdir. Xulosa qilib aytganda, taklif etilgan yondashuv logistika tizimlarining avtonomligini va vaqt omiliga nisbatan tolerantligini oshirish uchun yangi nazariy poydevor yaratadi.

Xulosa. Ushbu tadqiqot dinamik vaqt cheklovlari ostida omborxona logistikasida ko‘p robotli tizimlarni modellashtirishning yangi yondashuvini taqdim etdi. Tadqiqot davomida an’anaviy qat’iy cheklovli modellarning cheklangan imkoniyatlari tahlil qilinib, ularning o‘rniga vaqt omilini jarima funksiyasi orqali maqsad funksiyasining tarkibiy qismiga kirituvchi yangi matematik model ishlab chiqildi. Asosiy xulosa quyidagilardan iborat: taklif etilgan jarima funksiyasi yordamida robotlar dinamik muhitdagi kutilmagan o‘zgarishlarga (tirbandlik, kechikishlar) moslashib, yechim topa olmaslik holatidan qochish imkoniyatiga ega bo‘ladi.

Model nazariy jihatdan vaqt va xarajat o‘rtasidagi o‘zaro almashinuv muvozanatini saqlash orqali logistika tizimlarining avtonomligini ta’minlash uchun yangi poydevor yaratdi. Ushbu tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, dinamik jarima funksiyalaridan foydalanish robotlashtirilgan omborxonalarda operatsion samaradorlikni oshirishda istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi. Kelgusidagi ishlar mazkur matematik modelni real vaqt rejimida yechuvchi meta-evristik algoritmlar (Genetik algoritmlar yoki Reinforcement Learning) bilan boyitish va yirik miqyosdagi avtomatlashtirilgan tizimlarda sinovdan o‘tkazishga qaratiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Fragapane G., Hvolby H.-H., Sgarbossa F., Strandhagen J.O. Increasing warehouse efficiency by combining internal transport and automated storage and retrieval systems. International Journal of Production Economics. 2020, vol. 226, Art. 107629. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107629.

(2). Palleschi A., Pollayil G.J., Pollayil M.J., Garabini M., Pallottino L. High-Level Planning for Object Manipulation With Multi Heterogeneous Robots in Shared Environments // IEEE Robotics and Automation Letters. 2022, vol. 7, № 2, p. 3138–3145. DOI: 10.1109/LRA.2022.3145987.

(3). Wang J., Zheng S. Research on Path Planning Algorithms of Multiple Mobile Robots in Intelligent Warehousing. Proceedings of ICAROB 2022. 2022, p. 313–317. DOI: 10.5954/ICAROB.2022.OS34-1.

(4). Huo J., Zheng R., Zhang S., Liu M. Multi-Robot Path Planning in Narrow Warehouse Environments with Fast Feasibility Heuristics. 41st Chinese Control Conference (CCC). 2022, p. 1840–1845. DOI: 10.23919/ CCC55666. 2022.9902480.

(5). Chen J., Chen W., Li J., Wei X. va boshq. Path Planning Considering Time-Varying and Uncertain Movement Speed in Multi-Robot Automatic Warehouses: Problem Formulation and Algorithm // 2022 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS). 2022, DOI: 10.1109/CCIS57298. 2022. 10016376

(6). Inomova O.Sh. Transport masalasi yechimining avtomatlashtirilgan modeli. Python dasturlash tili asosidagi yondashuv. Yil tadqiqotchisi–2025. 2026, 2972–2984.-betlar URL: https://wordlyknowledge.uz/index.php/gpble/ article/ view/ 5029/ 7699 (murojaat sanasi: 13.06.2026).