

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ ЛИФТОВЫМ СТЕЛЛАЖОМ СРЕДНЕОПТОВОГО СКЛАДА

А.Е. Малкин

artemm.malkin@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложен вариант установки автоматического лифтового стеллажа в среднеоптовом дарксторе для комплектования заказов. Определена пропускная способность склада, являющаяся базовым параметром для определения основных характеристик автоматического стеллажа. Представлена структура его системы управления, построенная по иерархической схеме и связанная с системой управления даркстором. Приведены конструктивная схема автоматического лифтового стеллажа и описание работы данного устройства. Предложен алгоритм расчета основных элементов системы управления приводами стеллажа. С использованием данного метода по основным параметрам определены требуемые характеристики электродвигателей. На основании проведенного расчета выбраны базовые комплектующие системы управления автоматическим лифтовым стеллажом.

Ключевые слова

Даркстор, автоматический лифтовый стеллаж, челнок, система управления приводами, асинхронный мотор-редуктор, двигатель постоянного тока, микроконтроллер, частотный преобразователь

Поступила в редакцию 29.05.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. В настоящее время крупные торговые сети широко применяют технологию онлайн-заказов, в том числе товаров первой необходимости. Для обеспечения быстрой доставки этих товаров необходимо разработать разветвленную сеть складских помещений разного размера — дарксторов [1]. В России в этом формате уже несколько лет работают сети супермаркетов «О'Кей», «Перекресток», «Самокат» и др., причем некоторые предприятия торговли функционируют только в онлайн-формате [2].

Дальнейшее увеличение оперативности доставки связано с построением так называемых складов *последней мили* — небольших складских помещений для хранения товаров, расположенных на расстоянии, максимально близком к конечному потребителю [3]. Эти склады, часто находящиеся непосредственно в жилых зданиях, представляют собой автоматизированные складские системы в виде патерностеров или автоматических лифтовых стеллажей (АЛС) [4]. Как правило, АЛС содержит специальное подъемно-транспортное устройство (челнок),двигающееся вдоль вертикально расположенных полок и управляемое

промышленным контроллером [5]. Перспективный подход к построению АЛС — использование блочного принципа конструирования, что позволяет осуществлять масштабирование конструкции и монтировать ее в ограниченном объеме рабочего помещения [6].

Целью данной статьи — сформулировать предложения по разработке элементов конструкции и системы управления АЛС среднеоптового даркстора, размещенного в помещении ограниченной площади. В качестве исходных данных для расчета будем использовать значение средней пропускной способности склада [7].

Средняя суточная интенсивность *входящего потока* складских контейнеров с товарами в стеллажное хранилище, шт., определяется как

$$\lambda_{\text{приб}} = \frac{(1-\alpha) Q_{\text{сут}}^{\text{приб}} k_{\text{нер}}}{M_{\text{пак}} k_{\text{и}}},$$

где α — коэффициент, учитывающий долю транзитных контейнеров в общем потоке товарных поступлений, которые не попадают в зону автоматических лифтовых стеллажей, в рассматриваемом случае $\alpha = 0$; $Q_{\text{сут}}^{\text{приб}}$ — суточный грузопоток в стеллажное хранилище; $k_{\text{нер}}$ — коэффициент суточной неравномерности поступления товаров на склад, $k_{\text{нер}} = 1,1 \dots 1,3$; $M_{\text{пак}}$ — масса контейнера с товаром; $k_{\text{и}}$ — коэффициент использования грузоподъемности крана-штабелера или контейнера.

Средняя суточная интенсивность *выходящего контейнера* с товаром из стеллажного хранилища, шт., в свою очередь,

$$\lambda_{\text{убыв}} = \frac{(1-\alpha) Q_{\text{сут}}^{\text{убыв}} k_{\text{нер}}}{M_{\text{пак}} k_{\text{и}}},$$

где $Q_{\text{сут}}^{\text{убыв}}$ — суточный грузопоток, убывающий из стеллажного хранилища.

Пропускная способность склада $\lambda_{\text{п}}$, шт., составляет

$$\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{приб}} + \lambda_{\text{убыв}}.$$

В рамках данной статьи будем рассматривать небольшой даркстор, суточная пропускная способность $\lambda_{\text{п}}$ которого не превышает 1000 единиц товара. Это значение является исходным для определения всех основных характеристик АЛС.

Выбор конструктивной схемы АЛС. Одна из главных проблем при построении АЛС — удовлетворение противоречивых требований к номенклатуре хранимых товаров и сроку их оборачиваемости, с одной стороны, и ограниченными размерами складского помещения — с другой. Для конкретности ограни-

чимся площадью рабочего помещения склада в 40 м^2 (рис. 1, а). Это значение соответствует средней площади однокомнатных квартир первого этажа жилого здания, в котором может быть организован даркстор [8].



Рис. 1. Организация склада в помещении ограниченной площади:
а — план рабочих помещений склада; б — конструктивная схема АЛС

В данном помещении может быть размещено два АЛС на площадях 18,85 и $12,24 \text{ м}^2$ соответственно. Каждый АЛС (рис. 1, б) представляет собой многоуровневую конструкцию от пола до потолка, содержащую однотипные ячейки, вдоль которых перемещаются челнок (по вертикали) и полка (по горизонтали). Товары на складе размещаются в контейнерах стандарта ЕС-6432. Для АЛС такой конфигурации не требуется серьезного перепланировки помещения. Остальное пространство можно использовать под нужды курьеров и обслуживающего персонала.

Определение структуры системы управления АЛС. Систему управления АЛС предлагается строить по иерархической схеме (рис. 2). Ее центральным элементом служит *логико-вычислительный блок*, который через шину обмена данных RS-485 по схеме master–slave связан с единой системой управления складом (Warehouse Management System — WMS) [9], являющейся верхним уровнем иерархии. Логико-вычислительный блок, в свою очередь, связан с *блоком аварийных ситуаций* и *пультом оператора*. Первый контролирует функционирова-

ние АЛС при возникновении поломок и в других нештатных ситуациях, а второй необходим для оперативного управления АЛС и отображения текущего состояния его блоков. Основными элементами управления АЛС являются *челнок* и *полка*, связь с которыми также осуществляется через шину RS-485.

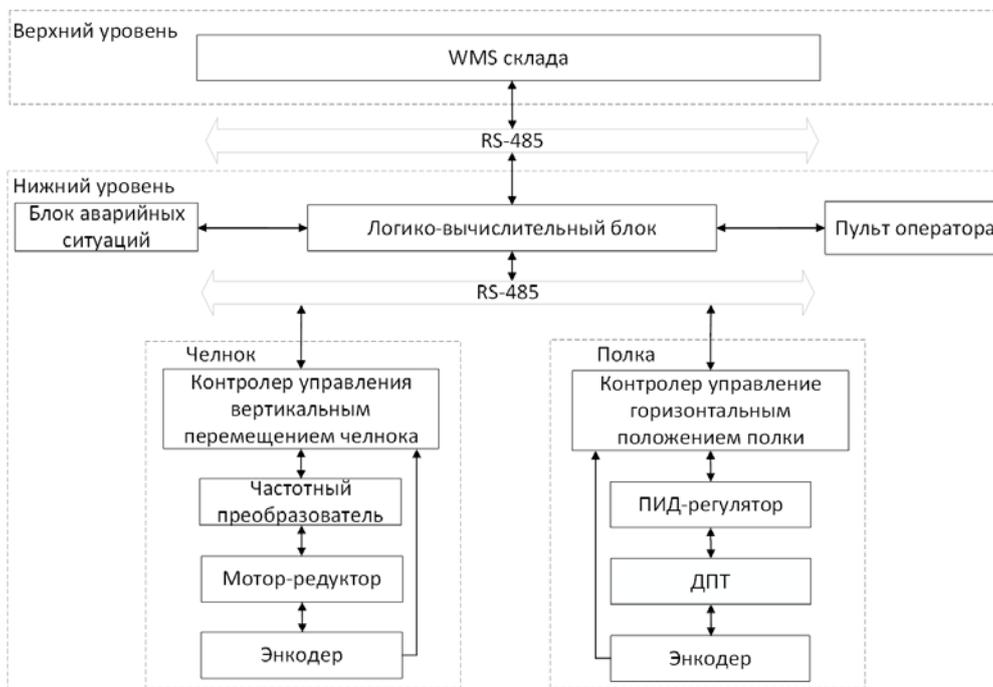


Рис. 2. Структура системы управления АЛС

Подъем и опускание челнока осуществляется с помощью мотора-редуктора на основе асинхронного двигателя, режимами которого управляет частотный преобразователь.

Управление горизонтальным перемещением челнока осуществляется с помощью привода постоянного тока, включающего двигатель, ПИД-регулятор и энкодер, установленный на валу двигателя.

В составе АЛС используются два типа приводов: асинхронный для управления вертикальным перемещением челнока и маломощный привод постоянного тока для управления горизонтальным перемещением полки.

Силовой расчет приводов вертикального и горизонтального перемещения. Для обеспечения горизонтальной и вертикальной тяги челнока с товарами в АЛС предлагается использовать ременную и цепную передачу соответственно. Перемещение челнока и полок осуществляется по роликовым направляющим. При включении двигателя горизонтального перемещения начинает вращаться звездочка ременной передачи и специальное устройство на ремне зацепляет

полку. Таким образом, ременная передача и боковые ролики позволяют контейнерам с товарами заехать и съехать с челнока (рис. 3, а). При включении двигателя вертикального перемещения начинает вращаться звездочка цепной передачи и челнок, жестко закрепленный специальным устройством на ремне и снабженный роликами, начинает движение вверх или вниз (рис. 3, б).

Выполним силовой расчет приводов вертикального и горизонтального перемещения.

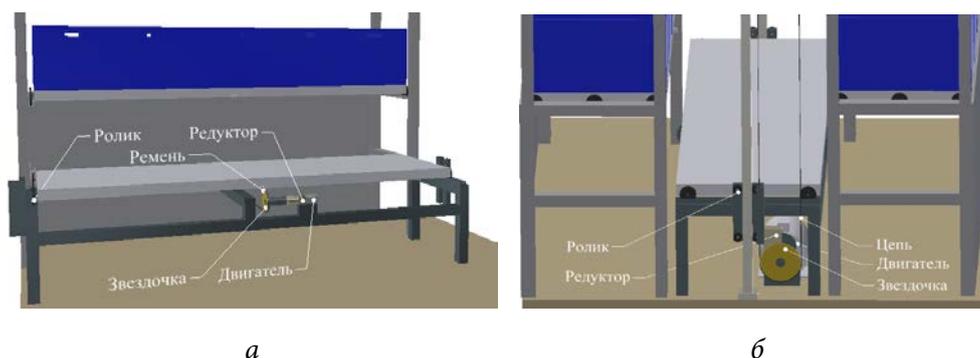


Рис. 3. Приводы перемещения АЛС:
а — горизонтального; б — вертикального

Определим все силы, действующие на систему «полка — ролики», для чего воспользуемся теоремой о движении центра масс механической системы:

$$\sum_{k=1}^n F = m\dot{v},$$

где F — сила, приложенная к телам и точкам системы; m — масса контейнеров с товарами и полкой; \dot{v} — требуемое ускорение перемещения центра масс груза, определяемый исходя из заданного значения пропускной способности $\lambda_{\text{п}} \leq 1000$ шт.

Определим расчетную массу полки с контейнерами. С учетом пропускной способности и требуемой вместимости склада в АЛС устанавливаются 20 полок, на каждой из которых хранится m_0 товаров в пяти одинаковых контейнерах. Обозначим $m_{\text{к}}$ — масса контейнера ЕС-6432, а $m_{\text{п}}$ — масса алюминиевой полки. Тогда масса груза, транспортируемого горизонтальным приводом, составит

$$m_1 = m_0 + 5 m_{\text{к}} + m_{\text{п}}.$$

Определим расчетную массу челнока с полкой и товарами. Обозначим массу алюминиевого каркаса челнока — m_{01} , массы двигателя и редуктора — $m_{\text{д}}$ и $m_{\text{р}}$ соответственно. Массу муфты, вала, звездочки ременной передачи, ремня обозначим как $m_{\text{доп}}$, роликов полки с осью вращения — $m_{\text{р}}$.

Тогда общая масса загруженного челнока может быть подсчитана по следующей формуле:

$$m_2 = m_{01} + m_d + m_p + m_{доп} + m_1 + 6 m_{кл}.$$

Запишем формулу для определения силы трения качения роликов полки (рис. 4):

$$F_{тр} = \frac{l}{r_p} N,$$

где l — плечо трения качения ролика; r_p — радиус ролика; N — нормальная реакция опоры.

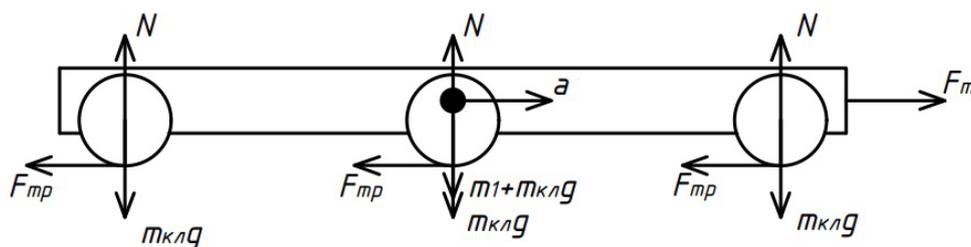


Рис. 4. Расчетная схема определения сил, развиваемых приводами АЛС

Запишем все силы, действующие на полку с колесами (см. рис. 4), с учетом того, что с другой стороны полки тоже установлены три ролика:

$$F_T + 6F_{тр} + 6N + mg + 6m_p g = (m + m_p)a,$$

где m_p — масса ролика; g — ускорение свободного падения; a — ускорение ролика.

Из полученных уравнений определяем требуемую силу тяги F_T . Для этого выберем значения коэффициента безопасности K_6 и определим необходимую мощность двигателя:

$$P = K_6 F_T v_{зв},$$

где $v_{зв}$ — окружная скорость на звездочке ременной передачи, равная скорости движения полки.

Найдем требуемый момент на звездочке:

$$T = K_6 F_T r,$$

где r — радиус звездочки.

Общий КПД механической системы

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_p \eta_{\text{рм}},$$

где η_p — КПД редуктора; $\eta_{\text{рм}}$ — КПД ременной передачи.

Тогда тяговый электродвигатель должен иметь мощность не ниже

$$P_{\text{э.тр}} = \frac{P}{\eta_{\text{общ}}}.$$

В соответствии с полученным значением выберем двигатель и редуктор привода. Учтем, что минимальное передаточное отношение редуктора

$$u_{\text{min}} = \frac{T}{T_{\text{дв}}},$$

где T — требуемый момент звездочки; $T_{\text{дв}}$ — момент на валу двигателя.

В завершение рассчитаем необходимую частоту вращения вала со звездочкой при заданных скорости и радиусе звездочки [10]:

$$n_b = 6 \cdot 10^4 \cdot \frac{v_{\text{зв}}}{\pi r}.$$

Таким образом, зная размеры даркстора и его пропускную способность, массу контейнеров с товарами и полок, а также нормы безопасности, получим следующие значения параметров для расчета системы управления АЛС (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для расчета системы управления АЛС

Параметр	Привод	
	горизонтального перемещения	вертикального перемещения
m , кг	43,4	62,0
r , м	0,050	0,085
$v_{\text{зв}}$, м/с	0,5	1,0
\dot{v} , м/с ²	1	2
K_6	2	2
η_p	0,96	0,97
$\eta_{\text{рм}}$	0,96	0,96

Выбор элементов системы управления АЛС. По приведенным выше формулам с использованием значений параметров из табл. 1 подберем электродвигатели приводов АЛС (табл. 2).

Таблица 2

Требуемые параметры электродвигателей АЛС

Параметр	Привод	
	горизонтального перемещения	вертикального перемещения
$P_{э.тр}$, Вт	51,3	1630,0
T , Н·м	4,59	126,50
n , об/мин	95,5	112,4

Исходя из значений табл. 2 выберем следующие элементы силовой части приводов.

Для привода горизонтального перемещения полки — двигатель постоянного тока Transmotec B4260-12 мощностью 52 Вт, масса — 0,55 кг [11] и двухступенчатый планетарный редуктор Neugart PLE040 с максимальным выходным моментом 70 Н·м и передаточным отношением 32 и массой — 0,4 кг [12]. Блок управления — микроконтроллер PIC16F887 [13]. Выбранный двигатель имеет встроенный энкодер.

Для привода вертикального перемещения челнока выберем асинхронный электродвигатель АИР100L6/945 об/мин мощностью 2,2 кВт, массой 38 кг [10] и одноступенчатый цилиндрический редуктор с передаточным отношением 7,55, массой 26 кг [14]. Блок управления — частотный преобразователь ESQ-A300-043-2.2К [15]. Для реализации обратной связи в приводе используем абсолютный энкодер АНС/АНМ36 [16]. Выбранные элементы системы управления АЛС представлены в табл. 3.

Данные устройства имеют невысокую стоимость, надежны в эксплуатации и легко программируются на языках промышленной автоматики.

Таблица 3

Элементы системы управления АЛС

Элемент	Привод	
	горизонтального перемещения	вертикального перемещения
Двигатель	Постоянного тока Transmotec B4260-12 	Асинхронный АИР100L6/945 

Окончание табл. 3

Элемент	Привод	
	горизонтального перемещения	вертикального перемещения
Редуктор	Планетарный Neugart PLE040 	Цилиндрический 
Блок управления	МК на основе PIC16F887 	Частотный преобразователь ESQ-A300-043-2.2K 
Датчики обратной связи	Энкодер, встроенный в электродвигатель	Абсолютный энкодер Sick ANS/АНМ36 

Заключение. В статье проведен расчет и выполнен подбор элементов конструкции и системы управления АЛС среднеоптового даркстора, размещенного в помещении ограниченной площади. Составлена структура автоматического стеллажа с интеграцией в систему управления складом. Предложен пример расчета горизонтального и вертикального приводов АЛС и выбраны основные компоненты для реализации транспортных операций по загрузке и выгрузке товаров. Применение автоматических лифтовых стеллажей позволяет ускорить транспортные операции в даркSTORE, масштабировать складское пространство,

а также максимизировать полезную площадь хранения товаров. Это открывает возможности для построения сети автоматизированных «складов последней мили», объединенных в единую систему.

Литература

- [1] Д — Дарксторы: как работает доставка еды. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/612c8ee89a7947628774a859> (дата обращения 21.02.2023).
- [2] Заказываем в дарксторе: почему это удобнее, чем магазин. URL: <https://vkusvill.ru/media/journal/zakazyvaem-v-darkstore-pochemu-eto-udobnee-chem-magazin.html> (дата обращения 21.02.2023).
- [3] Гонки на «последней миле». URL: <https://plus.rbc.ru/news/5d8d05ca7a8aa92cea8bceb4> (дата обращения 21.02.2023).
- [4] Реброва И.А., Бугаенко Е.В. Автоматизация и роботизация систем складирования. *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. IV Нац. науч.-практ. конф.: сб. матер.* Омск, СибАДИ, 2021, с. 139–144.
- [5] Путятин П.В. Автоматизация процесса складирования на основе подъемной установки с многофункциональным электроприводом и ПЛК. *Молодой ученый*, 2018, № 19 (205), с. 148–151.
- [6] Вовк М.А. Автоматизированные складские системы. *Мавлютовские чтения. Матер. XIV Всерос. молодежной науч. конф.: сб. тр.* В 7 т. Уфа, УГАТУ, 2020, т. 1, с. 107–113.
- [7] Шведов В.Е., Елисеева А.В., Иванова В.И. *Транспортно-складские логистические комплексы.* Санкт-Петербург, Интермедия, 2018, 96 с.
- [8] *Dark Store.* URL: <https://secrets.tinkoff.ru/glossarij/dark-store/> (accessed March 12, 2023).
- [9] Семахин Е.А., Романовская Е.В., Бычков Д.А., Гнездин А.В. Совершенствование складского логистического комплекса путем внедрения автоматизированной системы управления. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, 2019, т. 9, № 6А, с. 165–170.
- [10] Дунаев П.Ф., Леликов О.П. *Конструирование узлов и деталей машин.* Москва, Академия, 2008, 496 с.
- [11] *DC Motors.* URL: <https://www.transmotec.com/Download/Catalog/Transmotec-EN-DC-12W-450W-2022.pdf> (accessed March 12, 2023).
- [12] *PLE.* URL: https://cdn.neugart.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Catalog_Chapters/03_2023/PLE/PLE_03_2023_EN.pdf (дата обращения 21.02.2023).
- [13] *8-bit MCUs Products.* URL: <https://www.microchip.com/en-us/parametric-search/627> (accessed March 12, 2023).
- [14] *Редукторы и мотор-редукторы.* URL: https://privod.ru/upload/files/Каталог_механика_полный.pdf (дата обращения 12.03.2023).
- [15] *Каталог частотных преобразователей.* URL: <https://www.chastotnik.pro/upload/iblock/e3a/e3a4044eb5a212daaaa3cf1126e3db5f.pdf> (дата обращения 12.03.2023).

- [16] *The world of motor feedback systems for electrical drive engineering*. URL: https://cdn.sick.com/media/docs/8/28/228/special_information_the_world_of_motor_feedback_systems_for_electrical_drive_engineering_en_im0021228.pdf (accessed March 12, 2023).

Малкин Артем Егорович — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Воротников Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Малкин А.Е. Пример построения системы управления автоматическим лифтовым стеллажом среднеоптового склада. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 06 (83). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-910>

EXAMPLE OF BUILDING AN AUTOMATIC LIFT RACK CONTROL SYSTEM FOR THE MIDDLE-SIZED WHOLESALE WAREHOUSE

A.E. Malkin

artemm.malkin@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper propose an option in installing an automatic lift rack at the medium-sized wholesale dark store for order picking. The warehouse throughput is determined, which is the basic parameter in determining main characteristics of the automatic rack. Its control system structure is presented being built according to a hierarchical scheme and connected to the dark store control system. Structural diagram of the automatic lift rack and description of this device operation are provided. An algorithm for calculating main elements of the rack drive control system is proposed. Using this method, the required characteristics of electric motors were determined by the main parameters. On the basis of the performed calculation, major components of the automatic lift rack control system were selected.

Keywords

Dark store, automatic lift rack, shuttle, drive control system, asynchronous gear motor, DC motor, micro-controller, frequency converter

Received 29.05.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] D — Darkstory: kak rabotaet dostavka edy [D — Darkstores: how food delivery works]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/612c8ee89a7947628774a859> (accessed February 21, 2023).
- [2] Zakazyvaem v darkstore: pochemu eto udobnee, chem magazine [Ordering in the darkstore: why it is more convenient than the store]. URL: <https://vkusvill.ru/media/journal/zakazyvaem-v-darkstore-pochemu-eto-udobnee-chem-magazin.html> (accessed February 21, 2023).
- [3] Gonki na «posledney mile» [Racing on the «last mile»]. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5d8d05ca7a8aa92cea8bceb4> (accessed February 21, 2023).
- [4] Rebrova I.A., Bugaenko E.V. Automation and robotization of warehousing systems. *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. IV Nats. nauch.-prakt. konf.: sb. mater.* [Education. Transport. Innovation. Construction. IV National scientific and practical conference collection of materials]. Omsk, SibADI Publ., 2021, pp. 139–144. (In Russ.).
- [5] Putyatin P.V. Automation of the storage process based on a lifting unit with a multifunctional electric drive and PLC. *Molodoy uchenyy*, 2018, no. 19 (205), pp. 148–151. (In Russ.).
- [6] Vovk M.A. Automated storage systems. *Mavlyutovskie chteniya. Mater. XIV Vseros. molodezhnoy nauch. konf.: sb. tr.* [Mavlyutov readings. Materials of the XIV All-Russian Youth Scientific Conference: a collection of works]. Ufa, UGATU Publ., 2020, vol. 1, pp. 107–113. (In Russ.).

- [7] Shvedov V.E., Eliseeva A.V., Ivanova V.I. *Transportno-skladskie logisticheskie komplekсы* [Transport and warehouse logistics complexes]. Sankt-Petersburg, Intermediya Publ., 2018, 96 p. (In Russ.).
- [8] *Dark Store*. URL: <https://secrets.tinkoff.ru/glossarij/dark-store/> (accessed March 12, 2023).
- [9] Semakhin E.A., Romanovskaya E.V., Bychkov D.A., Gnezdin A.V. The improvement of warehouse logistics complex through the introduction of automated control system. *Economics: yesterday, today and tomorrow*, 2019, vol. 9, no. 6A, pp. 165–170. (In Russ.).
- [10] Dunaev P.F., Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin* [Designing units and parts of machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2008, 496 p. (In Russ.).
- [11] *DC Motors*. URL: <https://www.transmotec.com/Download/Catalog/Transmotec-EN-DC-12W-450W-2022.pdf> (accessed March 12, 2023).
- [12] *PLE*. URL: https://cdn.neugart.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Catalog_Chapters/2022/09_2022/PLE/PLE_USA.pdf (accessed February 21, 2023).
- [13] *8-bit MCUs Products*. URL: <https://www.microchip.com/en-us/parametric-search/627> (accessed March 12, 2023).
- [14] *Reduktory i motor-reduktory* [Gearboxes and gearmotors]. URL: https://privod.ru/upload/files/Katalog_mekhanika_polnyy.pdf (accessed March 12, 2023).
- [15] *Katalog chastotnykh preobrazovateley* [Catalog of frequency converters]. URL: <https://www.chastotnik.pro/upload/iblock/e3a/e3a4044eb5a212daaaa3cf1126e3db5f.pdf> (accessed March 12, 2023).
- [16] *The world of motor feedback systems for electrical drive engineering*. URL: https://cdn.sick.com/media/docs/8/28/228/special_information_the_world_of_motor_feedback_systems_for_electrical_drive_engineering_en_im0021228.pdf (accessed March 12, 2023).

Malkin A.E. — Student, Department of Computer Systems of Automation of Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Vorotnikov S.A., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Malkin A.E. Example of building an automatic lift rack control system for the middle-sized wholesale warehouse. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 06 (83). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-910>