

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-379-390

SIMULATION MODEL OF PRESTACKING AT THE SEAPORT CONTAINER TERMINAL

T. E. Malikova¹, E. E. Petrova²

¹ — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

² — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Automation and digitalization of both the entire process and components of technological operations of the terminal are one of the conditions for the balanced development of the port infrastructure of the Russian Federation. Container transshipment in the warehouse area is the most labor-intensive and frequently performed auxiliary operation of the technological process of any container terminal. That is why development of advanced driver assistance systems for mobile reloading equipment based on a digital twin of this operation is in high demand from the point of view of the terminal digitalization. The object of the study is the technological process of containers transshipment in the operating areas of the terminal with formation of auxiliary stacks to speed up the transfer of goods by the different transport means, as well as carrying out other auxiliary operations. The reloader performs the operation of partially dismantling the operational stack with removal from it of a certain number of target containers that make up the logistics flow of cargo moved to the auxiliary stack with the subsequent return of the blocking containers back to their previous stacks of the operational stack. The research method is the modeling of scenarios depending on the sequence of possible states of the simulated technological process. The used mathematical apparatus is automatic programming. The modeling tools are deterministic finite state machine. The main goal of developing the model is to convert the loader control function when performing a selective search operation for containers in an operational stack into a digital code, i. e. mapping the sequence of its possible states into a sequence of characters in the control line of the machine. The result of the study is a digital simulation model of the operation of selective removal of containers from the operational stack with implementation of the work scheme based on the principle of complete disassembly of blocking stacks and removal of containers only from the nearest row, as well as proof of the adequacy of the transition diagram of the finite state machine to the functioning mechanism of the simulated operation. The virtual environment of the automated control system for a mobile loader operating in the rear zone is the place where the digital model of selective removal of containers is used in the architecture of the digital twin of the container terminal. The main advantage of using this version of the finite state machine as an element of the automated control system is that there is no need to urgently interrupt the technological process to adjust operation of the loader at work positions.

Keywords: Digitalization of cargo operations, technological process, simulation modeling, container movement, digital twin, control system.

For citation:

Malikova, Tatiana E., and Ekaterina E. Petrova. "Simulation model of prestacking at the seaport container terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 379–390. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-379-390.

УДК 519.711.3:656.073.28

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕСТАКИНГА НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ МОРСКОГО ПОРТА

Т. Е. Маликова¹, Е. Е. Петрова²

¹ — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Российская Федерация

² — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
г. Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является одно из условий сбалансированного развития портовой инфраструктуры Российской Федерации: автоматизация и цифровизация как терминального процесса в целом, так

и отдельных составляющих его технологических операций. Отмечается, что перевалка контейнеров в складской зоне является самой трудоемкой и часто выполняемой вспомогательной операцией технологического процесса любого контейнерного терминала. Поэтому разработка наиболее часто используемых систем помощи водителю мобильной перегрузочной техники на основе цифрового двойника данной операции является востребованной с точки зрения цифровизации терминала. Объектом исследования является технологический процесс перевалки контейнеров в операционных зонах терминала с формированием вспомогательных штабелей для ускорения операции передачи грузов различными видами транспорта, а также осуществления других вспомогательных операций. При этом перегружатель выполняет операцию частичного расформирования операционного штабеля с изъятием из него некоторого числа целевых контейнеров, составляющих перемещаемый во вспомогательный штабель логистический поток груза, с последующим возвратом блокирующих контейнеров назад в их прежние стеки операционного штабеля. Методом исследования в работе является моделирование сценариев в зависимости от последовательности возможных состояний моделируемого технологического процесса, используемым математическим аппаратом — автоматное программирование, инструментом моделирования — детерминированный конечный автомат. Основной целью разработки модели служит преобразование функции управления погрузчиком при выполнении операции селективного поиска контейнеров в операционном штабеле в цифровой код, т. е. отображение последовательности его возможных состояний в последовательность символов управляющей строки автомата. Результатом исследования являются цифровая имитационная модель операции селективной выемки контейнеров из операционного штабеля с реализацией схемы работы по принципу полного разбора блокирующих стеков и выемки контейнеров только из ближнего ряда, а также доказательство адекватности диаграммы переходов конечного автомата к механизму функционирования моделируемой операции. Местом использования цифровой модели операции селективной выемки контейнеров в архитектуре цифрового двойника контейнерного терминала выбрана виртуальная среда системы автоматизированного управления мобильным перегружателем, работающим в тыловой зоне. Основным преимуществом использования данного варианта конечного автомата как элемента автоматизированной системы управления мобильным перегружателем является отсутствие необходимости экстренного прерывания технологического процесса для отладки работы последнего на рабочих позициях.

Ключевые слова: цифровизация грузовой операции, технологический процесс, имитационное моделирование, перемещение контейнеров, цифровой двойник, система управления.

Для цитирования:

Маликова Т. Е. Имитационная модель престакинга на контейнерном терминале морского порта / Т. Е. Маликова, Е. Е. Петрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 379–390. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-379-390.

Введение (Introduction)

Необходимым условием сбалансированного развития портовой инфраструктуры Российской Федерации является сквозная цифровизация транспортной цепочки доставки грузов и роботизация логистических операций, а также автоматизация и цифровизация терминальных операционных процессов [1]. Перевалка контейнеров в складской зоне с формированием вспомогательных штабелей для грузопотоков морского и сухопутного грузовых фронтов является самой трудоемкой и часто выполняемой вспомогательной операцией технологического процесса любого контейнерного терминала [2], [3]. Поэтому разработка продвинутых систем помощи водителю мобильной перегрузочной техники на основе цифрового двойника данной операции наиболее востребована с точки зрения цифровизации транспортной цепочки доставки грузов.

Актуальность и необходимость выполнения научных исследований в области автоматизации и цифровизации терминальных операционных процессов подтверждена результатами исследований [4]–[10], анализ которых убедительно доказал, что все существующие немногочисленные сценарии обработки операционного штабеля характеризуются общими недостатками: достаточно ограниченной функциональностью, повышенной трудоемкостью, обусловленной наличием непроизводительных операций, и, соответственно, большой продолжительностью выполнения операций транспортирования контейнеров между операционными зонами контейнерного терминала [11]–[13].

В связи с объективной необходимостью цифровизации операционных процессов контейнерного терминала в работе решена техническая задача, заключающаяся в разработке цифровой модели престакинга [14], [15] для слоя *виртуальное пространство цифрового двойника* [16], операции поиска и выемки целевых контейнеров в операционном штабеле.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методом исследования является моделирование сценариев в зависимости от последовательности возможных состояний моделируемого технологического процесса. Используемым математическим аппаратом в работе служит автоматное программирование, инструментом моделирования — детерминированный конечный автомат (ДКА). Основной целью разработки ДКА является преобразование функции управления погрузчиком при выполнении операции селективного поиска контейнеров в операционном штабеле в цифровой код [17], т. е. отображение последовательности его возможных состояний в последовательность символов управляющей строки из языка программирования его системы управления.

Известный способ выполнения операции престакинга [18], принятый за прототип, заключается в том, что с помощью строки символов (цифрового кода) управления ДКА первоначально задают местоположение погрузчика возле штабеля и целевых контейнеров, затем определяют число и местоположение блокирующих контейнеров, производят перемещение погрузчика к заданному стеку, вынимают блокирующие, вынимают и вывозят целевые контейнеры, возвращают блокирующие контейнеры в исходный стек. При этом в блоке управления погрузчиком как технологическим автоматом [19] запрограммирован цифровой код схемы работы с частичной разборкой штабеля и выемкой целевого контейнера через ряды. Данная схема предполагает использование ричстакера, требует формирования ступенчатого штабеля с уменьшающимся количеством ярусов по мере удаления ряда с целевым контейнером из-за длины вылета стрелы (рис. 1).

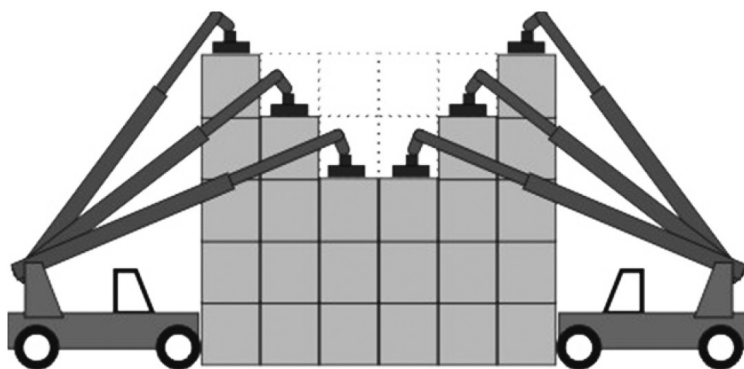


Рис. 1. Формирование штабеля под схему работы ричстакера через ряды (ступенчатая форма штабеля)

Fig. 1. Formation of a stack according to the reach-stacker operating scheme through rows (stepped stack shape)

В работе [20] доказано, что выемка целевых контейнеров из глубины штабеля посредством грузовой стрелы погрузчика в ряде случаев (при большом весе контейнера с грузом) опасна ввиду возможного смещения центра тяжести погрузчика и создания тем самым аварийной ситуации. При подъеме из глубины штабеля условно тяжелого контейнера происходит срабатывание механизмов защиты ричстакера, и операция прекратится на этапе захвата груза, т. е. отрыв груза спредером не будет выполнен. Прерывание операции выемки контейнеров через ряды на любом из ее этапов требует отладки работы погрузчика на рабочей позиции, что приводит к нарушению одного из важных принципов автоматизации — принципа «безотладочной» технологии.

В случае экстренной остановки на рабочей позиции выемка тяжелого контейнера, например, из второго поперечного ряда, погрузчику необходимо выполнить полный разбор первого

поперечного ряда блокирующих контейнеров, т. е. перейти к схеме работы с ближним рядом с полным разбором блокирующих стеков. Кроме того, при разборе штабеля из четырех поперечных рядов требуется наличие двух погрузчиков для одновременной работы с обеих его сторон (см. рис. 1), однако при этом не обеспечивается возможность выемки целевого контейнера при количестве поперечных рядов пять и более, что существенно ограничивает функциональность способа выполнения операции престакинга под управлением ДКА с цифровым кодом схемы операции «частичный разбор штабеля и выемка целевого контейнера через ряды».

Интерпретация символов кортежа ДКА

Множество	Элемент	Интерпретация
Q	q_1	Погрузчик перемещается вдоль рядов штабеля (продольных вправо)
	q_2	Погрузчик разбирает продольный ряд
	q_3	Погрузчик продвигается вглубь штабеля
	q_4	Погрузчик разбирает поперечный ряд
	q_5	Контейнер вывезен
	q_6	Погрузчик возвращает контейнер в поперечный ряд
	q_7	Погрузчик перемещается на один шаг назад
	q_8	Погрузчик возвращает контейнер в продольный ряд
Σ	●	Переместиться на один ряд вправо
	×	Снять контейнер в продольном ряду
	◇	Переместиться на один шаг вглубь штабеля
	∨	Снять контейнер из поперечного ряда
	▢	Вывести контейнер во вспомогательный штабель
	○	Вернуть контейнер в поперечный ряд
	◎	Переместиться на один шаг назад
	★	Вернуть контейнер в продольный ряд
	q_0	Нахождение погрузчика возле первого левого ряда (автомат в начальной вершине графа q_1)
F	f_1	Погрузчик перемещается на один ряд
	f_2	Погрузчик вынимает один контейнер из продольного ряда штабеля
	f_3	Погрузчик продвигается на один шаг вглубь штабеля
	f_4	Погрузчик вынимает один контейнер из поперечного ряда штабеля
	f_5	Вывоз контейнера во вспомогательный штабель
	f_6	Погрузчик возвращает один контейнер в поперечный ряд штабеля
	f_7	Погрузчик перемещается на один шаг назад
	f_8	Погрузчик возвращает один контейнер в продольный ряд штабеля

Для устранения указанных недостатков предлагается изменить цифровой код ДКА, принятого за прототип [18], на код (схему работы) операции «полный разбор блокирующих стеков и выемка контейнеров только из ближнего ряда, иными словами, расширить множество входных символов Σ , а также изменить последовательность состояний Q в функции переходов δ ДКА (рис. 2 и таблица). Вносимые дополнения в цифровую модель ДКА выделены в таблице фоном.

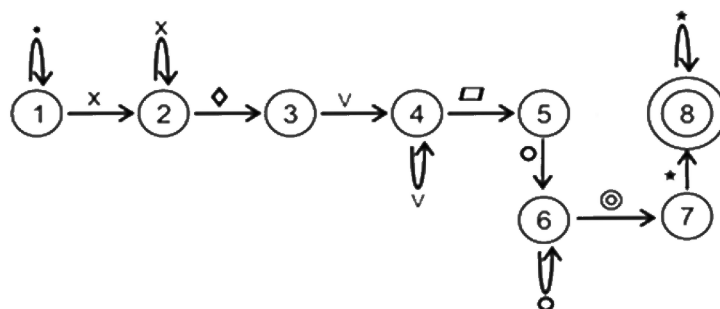


Рис. 2. Диаграмма переходов технологической схемы работы перегружателя с полным разбором блокирующих стеков
Fig. 2. Transition diagram of the technological scheme of the reloader operation with a complete disassembly of blocking stacks

Преобразование функции управления погрузчиком при выполнении операции селективного поиска контейнеров в операционном штабеле в цифровой код предложено осуществлять с использованием ДКА схемы операции полного разбора блокирующих стеков и выемки контейнеров только из ближнего ряда, заданного диаграммой переходов δ , приведенной на рис. 2, а также кортежем, состоящим из четырех множеств:

- множества состояний $Q\{q_1; q_2; q_3; q_4; q_5; q_6; q_7; q_8\}$;
- множества входных символов $\Sigma\{\bullet; \times; \diamond; \vee; \square; \circ; \odot; \star\}$;
- начального состояния q_0 ;
- множества допускающих состояний $F\{f_1; f_2; f_3; f_4; f_5; f_6; f_7; f_8\}$.

Интерпретация символов каждого из указанных множеств приведена таблице.

Результаты (Results)

Оценка адекватности диаграммы переходов ДКА. Выполним оценку адекватности диаграммы переходов ДКА операции выемки контейнеров с полным разбором стеков, т. е. проверим качественную адекватность: соответствие отображения (см. рис. 2) механизму функционирования погрузчика, полностью разбирающего блокирующие стеки и вынимающего контейнеры только из ближнего к его передней колесной паре ряда.

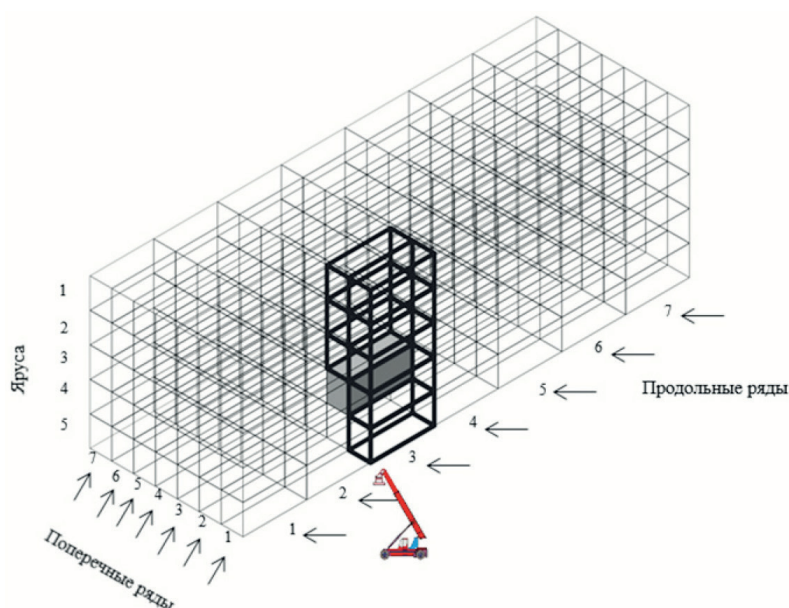


Рис. 3. Расположение целевого и блокирующих контейнеров в штабеле
Fig. 3. Location of target and blocking containers in a stack

Пусть целевой контейнер расположен в третьем продольном ряду и в четвертом ярусе второго поперечного ряда штабеля (рис. 3), т. е. координаты его местоположения в штабеле записываются как (3, 4, 2). Необходимо под управлением ДКА выполнить следующие действия:

- полностью разобрать стек с блокирующими контейнерами (обозначен на рис. 3 жирными линиями);
- снять три блокирующих контейнера, расположенных над целевым контейнером (показаны на рис. 3 жирными линиями);
- снять и вывести целевой контейнер во вспомогательный штабель;
- вернуть три контейнера на их прежнее место во второй поперечный ряд;
- вернуть пять контейнеров в третий продольный ряд, т. е. восстановить стек из пяти блокирующих контейнеров с учетом их прежнего местоположения в штабеле.

Для выполнения поставленной задачи в автомат подается последовательность входных символов $s_1, s_2, \dots, s_n$. Обозначим эту последовательность как строку S_{ijk} , где i -й индекс соответствует порядковому номеру продольного ряда ($i = \overline{1; n}$), j -й индекс — порядковому номеру яруса штабеля ($j = \overline{1; 5}$), k -й индекс — порядковому номеру поперечного ряда ($k = \overline{1; 2}$). Таким образом, в автомат будет подаваться строка управления S_{342} (рис. 4).

S	3	4	2	●	●	×	×	×	×	×	◇	V	V	V	V	▱	○	○	○	◎	★	★	★	★	★
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 4. Строка управления S_{342} , составленная из элементов множества входных символов Σ конечного автомата

Fig. 4. Control line S_{342} , composed of elements of the set of input symbols Σ of the finite machine

Начальное состояние автомата q_0 определено как «нахождение погрузчика возле первого продольного ряда (автомат находится в начальной вершине графа q_1)», т. е. в первой вершине графа (см. рис. 2). Для того, чтобы погрузчик мог осуществить выемку целевого контейнера из четвертого яруса второго поперечного ряда, необходимо сначала убрать блокирующие контейнеры, показанные на рис. 3 жирными линиями. Полностью разбираем стек с блокирующими контейнерами. При обработке первых двух символов (см. рис. 4) ДКА два раза пройдет по петле вершины q_1 и в результате останется в этой вершине (см. рис. 2). За один проход автомата по петле с символом ● погрузчик перемещается на один ряд вправо (см. таблицу). Таким образом, за два прохода по данной петле погрузчик переместится и займет положение напротив третьего продольного ряда штабеля (рабочее положение погрузчика для разбора стека с блокирующими контейнерами).

После обработки следующего символа строки управления $s_3 = \times$ автомат перейдет по ребру во вторую вершину диаграммы переходов (см. рис. 2), а погрузчик выполнит выемку верхнего блокирующего контейнера, расположенного в первом продольном ряду (см. рис. 3). При последовательной обработке последующих символов строки управления $s_{4-7} = \times$ ДКА выполнит четыре прохода по петле вершины q_2 и останется в этой вершине (см. рис. 2), а погрузчик, согласно соответствующим командам строки управления (см. рис. 4), снимет второй – пятый блокирующие контейнеры в продольном ряду (см. табл. 1). Стек с блокирующими контейнерами разобран (см. рис. 3). Удалим три блокирующих контейнера в стеке, где размещен целевой контейнер. После обработки следующего символа строки управления $s_8 = \diamond$ автомат совершит переход по ребру в третью вершину графа (см. рис. 2), а погрузчик переместится на один ряд вглубь штабеля (см. табл. 1), т. е. займет рабочую позицию — *разбор второго (ближнего) поперечного ряда штабеля*.

Следующий символ строки управления $s_9 = V$ даст автомату команду перейти по ребру в четвертую вершину (см. рис. 2), а погрузчик выполнит снятие первого блокирующего контейнера (см. таблицу), расположенного в первом продольном ряду и в первом ярусе второго поперечного ряда (см. рис. 3). При последовательной обработке следующих двух символов строки управления

$s_{10-11} = V$ ДКА пройдет два раза по петле вершины q_4 и останется в четвертой вершине. При этом погрузчик выполнит выемку второго и третьего блокирующих контейнеров (см. таблицу), расположенных во втором поперечном ряду первого продольного ряда. Теперь блокирующие контейнеры удалены, и доступ к целевому контейнеру открыт (см. рис. 3).

Вывоз целевого контейнера во вспомогательный штабель. При обработке следующего символа строки управления $s_{12} = V$ автомат еще раз пройдет по петле и останется в вершине q_4 , а погрузчик, согласно данной команде (см. таблицу), выполнит выемку целевого контейнера из штабеля. При обработке символа $s_{13} = \square$ автомат перейдет по ребру в вершину q_5 (см. рис. 2), в результате чего будет выполнена операция вывоза целевого контейнера во вспомогательный штабель.

Вернем блокирующие контейнеры в стек целевого контейнера, т. е. во второй поперечный ряд, соблюдая обратный порядок по отношению к операции их выемки. Обработав следующий управляющий символ $s_{14} = \bigcirc$ автомат перейдет в вершину q_6 , а погрузчик выполнит возврат третьего блокирующего контейнера из стека целевого контейнера во второй поперечный ряд данного стека. Обработка последовательности управляющих символов $s_{15-16} = \bigcirc$ заставит автомат совершать два прохода по петле и остаться в вершине q_6 , при этом погрузчик выполнит операцию возврата второго и первого блокирующих контейнеров данного стека во второй поперечный ряд. Стек целевого контейнера восстановлен (см. рис. 3).

Вернем контейнеры в блокирующий целевой контейнер стек, т. е. в третий продольный ряд (см. рис. 3), соблюдая обратный порядок по отношению к операции их выемки. Обработав символ $s_{17} = \odot$ автомат перейдет в вершину q_7 (см. рис. 2), при этом погрузчик переместится на один шаг назад, освободив место для размещения в штабеле блокирующего стека. Обработка управляющего символа $s_{18} = \star$ приведет автомат в вершину q_8 , а погрузчик выполнит операцию возврата пятого контейнера на его место в блокирующем стеке. Обработка последовательности символов строки управления $s_{19-22} = \star$ заставит автомат выполнить четыре прохода по петле и остаться в конечной вершине q_8 диаграммы переходов, а погрузчик выполнит возврат четвертого, третьего, второго и первого блокирующих контейнеров в стек, расположенный в первом поперечном ряду и первом продольном ряду штабеля (см. рис. 3). Операция возврата блокирующих контейнеров на их прежние места в операционный штабель завершена.

Таким образом, входная последовательность строки управления (см. рис. 4) была воспринята ДКА как допустимая, т. е. соответствующая его «языку» (символам кортежа) — см. таблицу. В свою очередь погрузчик под управлением ДКА выполнил частичный разбор штабеля и смог достать заблокированный целевой контейнер, расположенный в третьем продольном ряду, в четвертом ярусе и во втором поперечном ряду. Следовательно, отображение (см. рис. 2) соответствует модели структуры и механизму функционирования операции полного разбора блокирующих стеков и выемки контейнеров только из ближнего ряда, т. е. доказана качественная адекватность работы детерминированного конечного автомата с диаграммой переходов δ и «языком» (см. таблицу).

Обсуждение (Discussion)

Применение ДКА с диаграммой переходов (см. рис. 2) и цифровым кодом (см. таблицу) в блоке управления погрузчиком как технологическим автоматом имеет следующие преимущества:

- устранен риск аварийного прерывания технологической операции, так как перегружатель берет максимальный заявленный изготовителем вес только в том случае, если он касается колесной парой стека, в котором размещен поднимаемый в данный момент времени контейнер;
- универсален — пригоден для автоматизации процесса управления действиями как рич-стакера, так и погрузчика со спредером верхнего захвата;
- не имеет технологических ограничений на емкость (высоту и ширину, конфигурацию (см. рис. 1)) формируемых в зоне хранения штабелей при сохранении технических ограничений, а именно допустимой нагрузки на покрытие площадки.

Недостатком использования данного кода ДКА является увеличение количества непроизводительных операций при выемке целевых контейнеров, так как блокирующие стеки разбираются полностью, а не частично как в коде ДКА, представленного в работе [18]. Так как у каждого из разработанных ДКА имеются свои преимущества и недостатки, решение вопроса выбора одного из них в качестве цифровой модели престакинга для слоя *виртуальное пространство цифрового двойника операции поиска и выемки целевых контейнеров в операционном штабеле* напрямую зависит от технологического процесса конкретного контейнерного терминала. Иными словами, оба ДКА могут применяться для разработки цифровой имитационной модели блока управления технологического автомата только с учетом ограничительных особенностей их функционирования.

Аппаратная реализация ДКА как блока автоматического управления действиями погрузчика может быть выполнена двумя способами. Первый способ — написать собственный программный продукт, используя предназначенные для этой цели языки программирования. Второй способ — использовать готовые запрограммированные алгоритмы программных платформ, разработанных специально для инженеров и ученых (например, MATLAB) и успешно применяемых при решении, в частности, задач управления работой флота и порта [21], [22].

Способ имплементации конечных автоматов на различных языках программирования с обоснованием выбора последних в качестве инструментария реализации ДКА представлен в статье [23]. Возможности пакетов прикладных программ Stateflow и Xilinx System Generator платформы Matlab/Simulink, предназначенных для проектирования конечных автоматов совместно с методикой их последующей реализации в базе ПЛИС Xilinx подробно описаны в [24]. Главным аргументом в пользу выбора пакета прикладных программ MATLAB является то, что для его использования не обязательно быть профессиональным программистом. Если сравнить синтаксис команд языка MATLAB с синтаксисом любого из языков программирования, то первый намного проще и понятнее для простого пользователя. Кроме того, компьютерную программу, написанную на языке MATLAB, легко с помощью опции MatLab Coder импортировать в код языка программирования C/C++.

Таким образом, если реализацию ДКА в виде компьютерной программы будет выполнять программист, то рекомендуем выбрать один из языков программирования, например, таких как C, Java, Python. В противном случае целесообразно воспользоваться пакетом уже готовых прикладных программ, поддерживающих опцию проектирования конечных автоматов.

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана цифровая модель для слоя виртуальное пространство цифрового двойника операции селективной выемки контейнеров из операционного штабеля с использованием мобильного перегружателя типа ричстакер или погрузчик со спредером верхнего захвата на языке ДКА.
2. Доказана адекватность работы диаграммы переходов ДКА к механизму функционирования моделируемой операции полного разбора блокирующих стеков с выемкой контейнеров только из ближнего ряда.
3. Отличительная особенность разработанной цифровой модели операции селективной выемки контейнеров из операционного штабеля от других известных моделей [17], [18] состоит в том, что ее ДКА реализует механизм работы перегружателя по схеме «полный разбор блокирующих стеков и выемка контейнеров только из ближнего ряда». Главное преимущество использования данного варианта конечного автомата в виртуальной среде системы автоматизированного управления мобильным перегружателем в тыловой зоне контейнерного терминала состоит в том, что не нужно экстренно прерывать технологический процесс для отладки работы погрузчика на рабочих позициях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727294161> (дата обращения: 06.10.2023).

2. Кузнецов А. Л. Планирование имитационных экспериментов в задачах исследования операционных стратегий контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 4. — С. 105–112. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-105-112.

3. Маликова Т. Е. Организация таможенного контроля на контейнерных терминалах в морских пунктах пропуска / Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: FERBAT-13: материалы юбилейной десятой международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию адмирала Г. И. Невельского. — Владивосток: Российская академия транспорта, Дальневосточное отделение, 2013. — С. 81–83.

4. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

5. Король Р. Г. Проектирование динамической имитационной модели мультимодальной транспортно-логистической системы Дальнего Востока / Р. Г. Король, А. С. Акельев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2023. — № 4 (37). — С. 43–50.

6. Эглит Я. Я. Цифровизация контейнерных перевозок и их влияние на логистику / Я. Я. Эглит, О. Ю. Огальцова, А. В. Андорская, М. А. Шаповалова // Системный анализ и логистика. — 2019. — № 4 (22). — С. 40–46.

7. Zhou P. Anisotropic Q-learning and waiting estimation based real-time routing for automated guided vehicles at container terminals / P. Zhou, L. Lin, K. H. Kim // Journal of Heuristics. — 2023. — Vol. 29. — Pp. 207–228. DOI: 10.1007/s10732-020-09463-9.

8. Cuong T. N. Container throughput analysis and seaport operations management using nonlinear control synthesis / T. N. Cuong, H. S. Kim, X. Xu, S. S. You // Applied Mathematical Modelling. — 2021. — Vol. 100. — Pp. 320–341. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.039.

9. Yu H. Yard operations and management in automated container terminals: A review / H. Yu, Y. Deng, L. Zhang, X. Xiao, C. Tan // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. — Pp. 3419. DOI: 10.3390/su14063419.

10. Тимошек Е. С. Аналитический обзор моделей и методов в управлении работой флота / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 4 (101). — С. 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomtl01/7.

11. Соловьева Е. Е. Оптимизация работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов: технологический аспект / Е. Е. Соловьева // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта: Материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием. — Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2022. — С. 146–153.

12. Кузнецов А. Л. Влияние каргоплана судна-контейнеровоза на складские операции терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, Н. Оја // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 157–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168.

13. Соловьева Е. Е. Исследование подходов в разработке алгоритмов управления автоматизированной системой организации поиска и выемки контейнеров / Е. Е. Соловьева // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой международной научно-технической конференции. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2022. — С. 70–74.

14. Кузнецов А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Боревищ // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

15. Кузнецов А. Л. Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

16. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014. [Электронный ресурс] / M. Grieves. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (дата обращения: 06.10.2023).

17. Радочинская А. Ж. Модель формирования для таможенных целей вспомогательного штабеля контейнеров на языке конечных автоматов / А. Ж. Радочинская, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 2 (99). — С. 59–66.

18. Маликова Т. Е. Детерминированный конечный автомат поиска контейнеров в штабеле / Т. Е. Маликова, Е. Е. Соловьева, А. Ж. Радочинская // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 4 (105). — С. 91–100.

19. Соловьева Е. Е. Алгоритм управления действиями погрузчика при выборке контейнеров из операционного штабеля морского терминала / Е. Е. Соловьева, Т. Е. Маликова // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVI Международная научная конференция. В 3-х частях. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. — Т. Часть 3. — С. 127–132.

20. Ганнесен В. В. Обоснование схемы технологической операции расформирования контейнерного штабеля при автоматизации рабочего цикла автопогрузчика / В. В. Ганнесен, Т. Е. Маликова, Е. Е. Петрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 603–616. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616.

21. Тимошек Е. С. Оптимизация процесса обработки транспортных судов на рейде средствами линейного программирования MATLAB / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 771–781. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781.

22. Радочинская А. Ж. Моделирование процесса обработки импортного грузопотока на контейнерном терминале в среде MATLAB / А. Ж. Радочинская, А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Сборник докладов Второй Международной научной конференции. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. — С. 144–149. DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-144-149.

23. Розов Н. В. Обзор способов реализации конечного автомата на различных языках программирования / Н. В. Розов, А. И. Мартышкин // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIV Международной научно-практической конференции: в 3 ч. — Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. — Т. Часть 2. — С. 56–60.

24. Строгонов А. Проектирование конечных автоматов с использованием пакетов расширения Stateflow и Xilinx System Generator системы Matlab/Simulink / А. Строгонов, С. Цыбин, П. Городков // Компоненты и технологии. — 2015. — № 8 (169). — С. 41–48.

REFERENCES

1. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda. Web. 6 Oct. 2023 <<https://docs.cntd.ru/document/727294161>>.

2. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. “Planning simulation experiments in problems of studying operational strategies of container terminals.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2020): 105–112. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-105-112.

3. Malikova, T.E. “Organizatsiya tamozhennogo kontrolya na konteinernykh terminalakh v morskikh punktakh propuska.” *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vladivostok: DVO RAT, 2013. 81–83.

4. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Galin, and German B. Popov. “Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

5. Korol, Roman G., and Andrey S. Akeliev. “Designing a dynamic simulation model of a multimodal transport and logistics system of the Far East.” *Transport of the Asia-Pacific Region* 4(37) (2023): 43–50.

6. Eglit, Ya. Ya., O. Yu. Ogaltcova, A. V. Andorskaya, and M. A. Shapovalova. “Digitalization of container transportation and its impact on logistics.” *Sistemnyi analiz i logistika* 4(22) (2019): 40–46.

7. Zhou, Pengfei, Li Lin, and Kap Hwan Kim. “Anisotropic Q-learning and waiting estimation based real-time routing for automated guided vehicles at container terminals.” *Journal of Heuristics* 29 (2023): 207–228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10732-020-09463-9>.

8. Cuong, Truong Ngoc, Hwan-Seong Kim, Xiao Xu, and Sam-Sang You. "Container throughput analysis and seaport operations management using nonlinear control synthesis." *Applied Mathematical Modelling* 100 (2021): 320–341. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.039.
9. Yu, Hang, Yiyun Deng, Leijie Zhang, Xin Xiao, and Caimao Tan. "Yard operations and management in automated container terminals: A review." *Sustainability* 14.6 (2022): 3419. DOI: 10.3390/su14063419.
10. Timoshek, E.S., and T. E. Malikova. "Analytical review of models and methods in fleet management." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(101) (2021): 38–51. DOI 10.34046/aumsuomtl01/7.
11. Solovyova, Ekaterina E. "Optimization of operation of rear cargo fronts of sea container terminals: technological aspect." *Aktual'nye problemy razvitiya sudohodstva i transporta: Materialy Nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Vladivostok: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij rybohozyajstvennyj universitet, 2022. 146–153.
12. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semionov, and Hannu Oja. "Influence of a cargo plan on port operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 157–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168.
13. Soloveva, E.E. "Research of approaches in the algorithms development for managing an automated system for organizing the search and seizure of containers." *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: Materialy Pyatoy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchatskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. 70–74.
14. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Albert Z. Borevich. "Analysis of optimization container stacking strategies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.
15. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. "Box selectivity in different container cargo-handling systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.
16. Grieves, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014. Web. 6 Oct. 2023 <https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication>.
17. Radochinskaia, A. Zh., and T. E. Malikova. "The model of a subsidiary container stack formation for customs purposes using finite-state machine description language." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(99) (2021): 59–66.
18. Malikova, T.E., E. E. Soloveva, and A. Zh. Radochinskaia. "Deterministic finite state machine for search of containers in stack." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(105) (2022): 91–100.
19. Solovieva, E.E., and T. E. Malikova. "The algorithm for controlling the loader operations when selecting containers from the marine terminal operational stack." *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy: Sbornik statei XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya*. Vol. 3. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023. 127–132.
20. Gannesen, Vitalii V., Tatiana E. Malikova, and Ekaterina E. Petrova. "Justification of the container stack unpacking technological operation scheme in the automation of the loader work cycle." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 603–616. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616.
21. Timoshek, Elena S., and Tatiana E. Malikova. "Optimization of the handling process of transport vessels on the raid by means of linear programming MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 771–781. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781.
22. Radochinskaia, A. Zh., A. A. Yanchenko, and T. E. Malikova. "Simulation of the import bound cargo traffic processing at a container terminal in MATLAB environment." *Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii: Sbornik dokladov Vtoroi Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2021. 144–149. DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-144-149.
23. Rozov, N.V., and A. I. Martyshkin. "Overview of implement a finite state machine in various programming languages." *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei XXIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol. 2. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G. Yu.), 2019. 56–60.
24. Strogonov, A., S. Tsybin, and P. Gorodkov. "Proektirovanie konechnykh avtomatov s ispol'zovaniem paketov rasshireniya Stateflow i Xilinx System Generator sistemy Matlab/Simulink." *Komponenty i tekhnologii* 8(169) (2015): 41–48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маликова Татьяна Егоровна —

доктор технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50 а
e-mail: Malikova@msun.ru

Петрова Екатерина Евгеньевна —

старший преподаватель
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, д. 52-Б
e-mail: pillers@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malikova, Tatiana E. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Maritime State University named
after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: Malikova@msun.ru

Petrova, Ekaterina E. —

Senior Lecturer
Far Eastern State Technical
Fisheries University
52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation
e-mail: pillers@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2024 г.

Received: April 22, 2024.