

problems and ways of their solution in science, transport, production and education' 2012". Vol. 1. Is. 4. Odessa: KUPRIENKO, 2012: 83–90.

19. Ermakov, S. V. "Analiz sistemy "sudovoditel v situacii." *Vestnik of MSTU* 16.4 (2013): 699–703.

20. Bondarev, V. A., and S. V. Ermakov. "Ponjatie "Jekstremalnaja situacija" v kontekste bezopasnosti moreplavaniya." *Morskaja industrija, transport i logistika v stranah regiona Baltijskogo morja: novye vyzovy i otvety: materialy IX Mezhdunarodnoj konferencii*. Kaliningrad: Izdatelstvo BGARF, 2011: 37–38.

21. Ermakov, S. V. "Formalization and the content of term "navigational situation." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 17–21.

22. Ermakov, S. V. "Expert evaluation as the basis of building method of formalized assessment of complexity of navigational situation." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 2 (2013): 122–128.

23. Ermakov, S. V. "Method of formalized assessment of complexity of navigational situation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 26–31.

24. Ermakov, S. V. "Psychological Stability of Navigator, as the Primary Determinant of Human Factor Influence on the Navigational Safety of the Vessel." *Life safety* 5 (2013): 14–19.

25. Ermakov, S. V. "Rezultaty issledovanija psihologicheskoy ustojchivosti sudovoditelej." *Teorija i praktika sovremennoj nauki: materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, g. Moskva, 26–27 marta 2013 g. V 2 t.: t. I / Nauch.-inf. izdat. centr "Institut strategicheskikh issledovanij"*. M.: Speckniga, 2013: 75–79.

26. Ermakov, S. V. "Mathematical model of last moment maneuver with passive factor." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 41–48.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович —  
старший преподаватель.  
Балтийская государственная академия  
рыбопромышленного флота  
esv.klgd@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov Sergey Vladimirovich —  
Senior Lecturer.  
BFFSA  
esv.klgd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-50-61  
УДК 656.613: 519.86

И. В. Зуб,  
Ю. Е. Ежов

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ ТЕХНИКИ НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ

В работе рассмотрены проблемы безопасности эксплуатации перегрузочной техники на контейнерном терминале (КТ). Поставлена задача посредством имитационной модели выявить конфликтные ситуации, которые оказывают влияние на безопасность эксплуатации КТ. В процессе эксплуатации КТ существует вероятность возникновения аварии, инцидента, отказа и повреждения перегрузочной техники (ПТ), что влечет за собой нарушение правил промышленной и экологической безопасности (разлив топлива, гидравлического масла и т. п.). В результате этих обстоятельств снижается скорость обработки транспортных средств и пропускная способность КТ, что влечет за собой экономические потери, а также возможные потери грузоперевозчиков. При эксплуатации ПТ на промышленную безопасность оказывают влияние следующие факторы: квалификация оператора ПТ, психофизиологическое состояние оператора, состояние окружающей среды (погодные условия, состояние покрытия терминала, интенсивность движения транспортных средств и другой ПТ, сложность выполняемой операции). Повышение уровня безопасности труда решается с помощью проведения организационных мероприятий (проведение инструктажей, разработка инструкций по охране труда и рабочих технологических карт, издание приказов и распоряжений, проведение стажировок с вновь поступившими на работу сотрудниками, проведение ежегодных проверок знаний, обучение сотрудников на рабочем месте и в учебно-курсовых комбинатах) и технических мероприятий (проведение регламентных работ, диагностика, контроль за эксплуатацией

*ПТ). Нарушение технологии работ с опасными грузами могут повлечь не только нарушение промышленной, но и экологической безопасности. Некачественное проведение ремонта ПТ приводит к нарушениям промышленной, экологической и экономической безопасности. Отмечается, что в ходе моделирования были получены следующие результаты: определены конфликтные ситуации, которые могут развиваться по нескольким различным сценариям; определен оптимизирующий параметр  $\tau$  (время восстановления работоспособности ПТ); определен объект оптимизации — производительность ПТ.*

*Ключевые слова: контейнерный терминал, безопасность эксплуатации, экологическая безопасность, перегрузочная техника, имитационная модель, пропускная способность.*

## Введение

Применение контейнеризации позволяет перевозить грузы с использованием практически всех видов транспорта. Эффективность смешанных перевозок достигается в том случае, когда минимизированы трудозатраты и время оказания погрузочно-разгрузочной услуги (ПРУ) на контейнерном терминале (КТ). Будем рассматривать КТ как систему, состоящую из взаимосвязанных и взаимодействующих между собой подсистем: технической, технологической, информационной и организационной:

$$КТ = \{\text{Технич. сист., Технолог. сист. ОС, ИС}\}, \quad (1)$$

где Технич. сист. — техническая система; Технолог. сист. — технологическая система; ОС — организационная система; ИС — информационная система.

На КТ, как и в любой транспортной системе, выделяются исходные и конечные пункты транзакций, перемещаемые объекты, техническое оборудование и штат квалифицированного персонала. В любой из подсистем при нарушении равновесия происходят нештатные ситуации, оказывающие влияние на безопасную эксплуатацию, которая является интегральным понятием и включает в себя промышленную, экологическую и экономическую безопасность.

КТ как самостоятельное звено логистической цепи оказывает погрузо-разгрузочную услугу (ПРУ) владельцам груза. Качественными составляющими ПРУ являются время оказания ПРУ и сохранность груза. В терминальные услуги также включена услуга по хранению груза. Время хранения и оказания ПРУ оказывает влияние на пропускную способность КТ ( $ПС_{КТ}$ ), а, следовательно, и на экономическую безопасность. Время оказания ПРУ зависит от автоматизации работ, производительности и технического состояния парка перегрузочной техники (ПТ).

Парк ПТ формируется в зависимости от принятой терминальным оператором технологической схемы погрузочно-разгрузочных работ (ПРР). Для обеспечения работоспособного состояния ПТ разрабатывается система технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). Оптимизация циклов ТО и Р снижает эксплуатационные расходы на содержание ПТ и себестоимость ПРР, что повышает конкурентоспособность терминала.

## Основная часть

**Промышленная безопасность и охрана труда.** Сложность в исследовании и решении проблем охраны труда (ОТ) и промышленной безопасности (ПБ) заключается в том, что её непосредственное измерение невозможно. Безопасная и эффективная работа КТ зависит, прежде всего, от степени совершенства применяемой ПТ, технологических процессов, своевременного и качественного выполнения ТО и Р, осуществления организационных мероприятий и квалификации инженерно-технических работников и рабочих.

При дефиците на КТ квалифицированных специалистов одну или несколько функций ремонтной службы (РС) передают на аутсорсинг. Оценка эффективности от аутсорсинга производится по однокритериальной модели. Когда аутсорсинг оказывает комплексное влияние на показатели терминала, оценка эффективности производится по многокритериальной модели [1]. Решение об аутсорсинге принимается при сравнении текущего уровня эффективности системы ТО и Р

и эффекта, который достигается при передаче функциональных обязанностей по ТО и Р на аутсорсинг. Для этого формируется комплекс критериев, позволяющих определить качество и стоимость работ [2]. Проведение такого анализа позволяет выбрать стратегическое решение о развитии РС или рассматривать вопрос о переводе обслуживания ПТ на аутсорсинг [3]. Для определения функций, передаваемых на аутсорсинг, рассматриваются риски, которые позволяют оценить влияние аутсорсинга на деятельность терминала [4].

Передавая ПТ на ТО и Р аутсорсинговой организации (АО), терминальный оператор передает этой организации часть финансовых рисков, которые могут возникнуть из-за изменения стоимости запасных частей и комплектующих, в том числе из-за колебаний курса валют. Причем терминальный оператор в случае невыполнения АО качественного ремонта ПТ и срыва отгрузок может потерять грузоперевозчика. Кроме того, при передаче ТО и Р на аутсорсинг терминальный оператор сокращает свой ремонтный персонал. В случае расторжения договора с АО набрать квалифицированный персонал в короткие сроки сложно, что оказывает отрицательное влияние на промышленную и экономическую безопасность терминала.

Потенциально опасными объектами (ОО) на КТ являются ПТ и опасные грузы (ОГ) на тех КТ, которые имеют лицензию на работы с опасными грузами:

$$ОО = ПТ + ОГ. \quad (2)$$

Основной перегрузочной техникой КТ являются: *STS* (причальный перегружатель), краны на пневмоходу, ричстакеры, автоконтейнеровозы. ПТ с двигателем внутреннего сгорания оказывают влияние не только на промышленную, но и на экологическую безопасность.

Проблема ПБ рассматривается как важнейший аспект использования различной ПТ. Это обусловливается сложностью ПТ и тем возможным ущербом, который может быть нанесен в случае отказа ПТ при работе с ОГ и в случае его повреждения. Последовательность реализации технических, технологических и организационных решений зависит от стратегических целей терминального оператора и возможностей КТ. Организационные и технические мероприятия по ОТ и ПБ требуют оценки их эффективности, в том числе и экономической.

ПТ как объект повышенной опасности рассматривается как при эксплуатации (экспл.), так и при проведении ремонтно-профилактических работ (РПР) (технического обслуживания (ТО)), планово-предупредительных ремонтов (ППР), осмотров ( $L$ ) и испытаний ( $Tt$ ):

$$ПТ = f(\text{Экспл.}, \text{ТО}, \text{ППР}, L, Tt). \quad (3)$$

При эксплуатации ПТ (Экспл. ПТ) на безопасность производства работ оказывают влияние следующие факторы: квалификация оператора ( $Kв.о$ ) ПТ, психофизиологическое состояние ( $Pf$ ) оператора, состояние окружающей среды (ОС) (погодные условия, состояние покрытия терминала, интенсивность движения транспортных средств и другой ПТ, сложность выполняемой операции (выполнение операций при ППР контейнеров или негабаритного груза)), качество ППР ( $Q_{ППР}$ ):

$$\text{Экспл. ПТ} = f(Kв.о, Pf, ОС, Q_{ППР}). \quad (4)$$

При проведении ППР ПТ на безопасность ремонтных работ оказывают влияние: квалификация ремонтного персонала ( $Kв_{РП}$ ), исправность и соответствие используемого инструмента ( $T$ ), условия проведения ППР.

На качество ППР влияют: квалификация ремонтного персонала ( $Kв_{РП}$ ), наличие технической документации (ТД) и средств диагностики (СД), качество запасных частей ( $ЗЧ_k$ ), качество технических жидкостей и смазок ( $Q_{ТЖ}$ ), состояние окружающей среды (ОС):

$$Q_{ППР} = f(Kв_{РП}, T, ТД, СД, Q_{ТЖ}, ОС). \quad (5)$$

Повышение уровня безопасности труда решается двумя методами: внедрением организационных мероприятий (ОМ) и технических мероприятий (ТМ) на основе оценки условий ОТ и ПБ. К ОМ относятся: проведение инструктажей по ОТ и ПБ ( $Ин_{ОТ \text{ и } ПБ}$ ), разработка инструкций по охране труда (ИОТ), разработка рабочих технологических карт (РТК) погрузочно-разгрузочных

работ, издание приказов и распоряжений (ПР) в области ОТ и ПБ, проведение стажировок с вновь поступившими на работу сотрудниками (Ст.), проведение ежегодных проверок знаний (ПЗ), обучение сотрудников на рабочем месте и в учебно-курсовых комбинатах (Об.):

$$OM = f(\text{Ин}_{\text{ОТ и ПБ}}, \text{ИОТ}, \text{РТК}, \text{ПР}, \text{Ст.}, \text{ПЗ}, \text{Об}). \quad (6)$$

Под ТМ понимается своевременное и качественное проведение ТО, планомерно-предупредительных ремонтов (ППР), осмотров и испытаний ПТ, разработка и изготовление специальных грузозахватных приспособлений (ГЗП):

$$TM = f(\text{ТО}, \text{ППР}, L, Tt, \text{ГЗП}). \quad (7)$$

Для оценки условий труда проводится аттестация рабочих мест. При этом оцениваются условия труда по гигиеническим критериям, травмобезопасности и обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты. Данные показатели характеризуют состояние условий труда, но не учитывают профессиональные качества оператора ПТ и техническое состояние ПТ. Техническое состояние ПТ зависит от качества профилактического обслуживания, квалификации и психофизиологического состояния ремонтного персонала. Квалификация и психофизиологическое состояние операторов ПТ и ремонтного персонала оказывают влияние на производительность и безопасность труда. Для определения квалификации и психофизиологического состояния требуются оценочные показатели, которые могли бы учесть их влияние на уровень безопасности ПТР. Если оценка квалификации сотрудников не вызывает затруднений, то оценка психофизиологического состояния сотрудников требует разработки и применения специальных тестов.

Показатели тестов психофизиологического состояния, прошедшие математическую обработку, позволяют наряду с качественной оценкой квалификации сотрудника определить его профессиональные возможности и пути повышения его квалификации, сделать вывод о соответствии квалификации сотрудника выполняемому технологическому процессу. Эти показатели учитываются при планировании и распределении сотрудников по участкам работ. Внедрение указанных организационных мероприятий на основе тестовых показателей будет способствовать снижению вероятностных рисков возникновения аварийных ситуаций.

При оценке безопасности ПТР с помощью вероятностных показателей возникает затруднение в математическом описании действий оператора по управлению ПТ и действий по устранению последствий воздействия неблагоприятных факторов.

По статистическим показателям проводят оценку аварийности за определенный период. Эти показатели происшествия как потенциально возможный исход погрузочно-разгрузочного цикла. Подобный исход является по своей природе случайным событием в силу возникновения неблагоприятных факторов, влияющих во времени и пространстве на движения ПТ и контейнера.

За уровень безопасности выполнения погрузочно-разгрузочного цикла принимают вероятность  $P$  благополучного его завершения. За вероятность неблагоприятного погрузочно-разгрузочного цикла (уровень риска) принимаем  $Z$ , при этом

$$P + Z = 1. \quad (8)$$

Вероятности  $P$  и  $Z$  являются показателями безопасности погрузочно-разгрузочного цикла. Исходя из формулы (8), для оценки безопасности одного погрузочно-разгрузочного цикла или уровня риска достаточно знать одну из указанных вероятностей.

Использование на КТ современной ПТ не привело к сокращению аварийных отказов и внеплановых простоев. В случае отсутствия резервного оборудования продолжительные простои техники нарушают ритмичность работы КТ. Это приводит к увеличению нагрузки на работников, обслуживающих ПТ, отрицательно сказывается на результатах труда, ведет к возрастанию вероятности получения производственных травм и профессиональных заболеваний. Одним из важных направлений снижения аварийности является автоматизация перегрузочных процессов.

**Автоматизация перегрузки контейнеров.** Для оптимизации работы ПТ ведутся работы по уменьшению времени рабочего цикла. Это достигается двумя способами: 1) заменой механизмов на более производительные; 2) автоматизацией процессов ПТР. Второй способ наиболее предпочтительный по двум причинам: во-первых, он менее затратный, во-вторых, автоматизация ПТР не только сокращает время работ, но и обеспечивает сохранность груза, исключает аварийные ситуации, которые могут произойти из-за ошибок оператора.

Системы автоматизации ПТ используют программные модули для отслеживания преград в зоне работ и профиля расположения контейнеров на судне или в штабеле. В дальнейшем, за счёт применения информационных технологий предполагается использовать систему автоматической идентификации контейнеров. Автоматизация ПТР позволяет не только уменьшить время рабочих циклов, но и сократить время работы ПТ, что приводит к увеличению времени между ТО и Р. В АСУ КТ объектом управления является технологический процесс, заключающийся в погрузке / выгрузке с / на транспортное средство контейнеров и их размещении и хранении в штабеле. Часто контейнеры в штабеле размещены в произвольном порядке, что приводит к лишним операциям при отгрузке нужного контейнера.

Последовательность событий принято называть потоком, следовательно, можно говорить о входном потоке контейнеров. Поток может быть регулярным, когда контейнеры поступают через равные промежутки времени, и случайным, когда интервалы являются случайной величиной. Несмотря на различия в типах контейнеров, они требуют реализации одинаковых операций, и с этой точки зрения поток является однородным. В случайном однородном потоке интервалы между поступлением контейнеров — случайные величины, они характеризуются функцией плотности распределения по экспоненциальному закону с плотностью вероятности  $p(t) = \nu e^{-\nu t}$ , где  $\nu$  — интенсивность обслуживания. При этом  $P_k(t)$  — вероятность того, что в течение промежутка времени  $t$  поступит  $k$  контейнеров, выражается формулой

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где  $\lambda$  — интенсивность потока, равная математическому ожиданию числа контейнеров (заявок), поступающих на терминал за единицу времени.

Зная ресурсы и закон функционирования терминала, можно сделать прогноз, как будет работать терминал при увеличении потока заявок и определить основные характеристики (скорость обслуживания транспортного средства, среднее время ожидания транспортным средством обслуживания). На основании полученных данных терминальный оператор будет планировать количество каналов обслуживания и состава парка перегрузочной техники. При этом терминальный оператор ориентируется на следующие критерии:

- 1) критерий ограничения расходов на оказание погрузочно-разгрузочной услуги  $P$ :

$$P = P_{\text{ПТ}} + P_{\text{обс}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $P_{\text{ПТ}}$  — расходы на приобретение перегрузочной техники;

- 2) критерий наибольшего экономического эффекта  $\mathcal{E}_{\text{эфф}}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{эфф}} = C_{\text{пост}} - C_c \rightarrow \max, \quad (11)$$

где  $C_{\text{пост}}$  — поступающие средства (за вычетом налогов);  $C_c$  — расходы на системы, обеспечивающие поступление средств.

КТ является управляемой системой, на поведение которой оказывается целенаправленное воздействие. Под влиянием данного воздействия КТ переходит из одного состояния в другое. Управление КТ характеризуется двумя группами параметров. К первой группе относятся параметры, определяющие состояние терминала ( $x, y$ ). Поведение терминала во времени характеризуется функцией  $x = x(t)$ . Ко второй группе относятся внешние управляющие параметры  $u$ ,

их воздействия во времени определяется функцией  $u = u(t)$ . Пара  $(x(t), u(t))$  — управляемый процесс.

Отечественный и зарубежный опыт разработки АСУ показал, что среди объектов, подлежащих автоматизации, широкий класс образуют ТП, которые являются сложными стохастическими объектами, подверженными действию внешней среды с плохо определенной математической моделью.

С учетом воздействия внешней среды структурно-адекватная модель КТ будет иметь следующий вид:

$$\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{\theta}), \quad (12)$$

где  $y$  — предсказанное значение выходного показателя;  $f(x)$  — известная функция;  $\bar{x} \in X$  — вектор управляемых переменных;  $\bar{\theta}$  — вектор оценок параметров.

Под воздействием внешней среды подразумевается прибытие транспортных средств (ТС) под погрузку / выгрузку. Прибытие ТС, отказы ПТ носят стохастический характер, в связи с этим часто принятие управляющего решения происходит в условиях неопределенности.

Задача нахождения оптимального управления с учётом неопределённости может быть сформулирована в одном из следующих вариантов:

$$\bar{x}_1^* = \arg \min_{x \in X} [f(\bar{x}, \bar{\theta}) + g(L)\sqrt{d(\bar{x})}]; \quad (13)$$

$$\bar{x}_2^* = \arg \min_{x \in D} f(\bar{x}, \bar{\theta}), D = \{\bar{x} \in X, d(\bar{x}) \leq d_0\}, \quad (14)$$

$d(\bar{x})$  — дисперсия прогноза выхода модели (1), которая является известной функцией значений  $\bar{x}$ ;  $g(L)$  — квантиль нормированного распределения для заданной вероятности  $L$ .

Решения (13) и (14) отличаются от обычно используемого на практике решения

$$\bar{x} = \arg \min_{x \in X} f(\bar{x}, \bar{\theta}) \quad (15)$$

тем, что они учитывают неточность прогноза модели (12). При этом в случае использования варианта (13) вводится штраф за неточность модели, а в случае (14) допустимыми векторами считаются лишь те, для которых дисперсия прогноза  $d(\bar{x})$  не превосходит заданную величину  $d_0$ .

Перспективы развития АСУ КТ связаны с дальнейшим углублением и расширением информационной интеграции контейнерного плана со сменно-суточным планом и прибытием транспортных средств. Внедрение АСУ обеспечивает оперативность принятия экономически и технологически целесообразных решений. Информационные ресурсы являются экономической ценностью и выступают как один из факторов управления КТ.

**Имитационная модель работы контейнерного терминала.** Для исследования КТ использовалась имитационная модель, построенная посредством аппарата сети Петри, что позволило провести анализ поведения системы при её функционировании [5]. Формализм сетей Петри даёт возможность применять аналитические методы как для анализа исполнения, так и для верификации логических свойств исследуемых процессов, а также требует точных определений и исключает неопределенность и противоречия [6]. Последовательность событий сети образует моделируемый процесс, отражая его структурно-логическую связь.

Ряд специфических особенностей терминала делает целесообразным использование сетей Петри для его описания и анализа:

- в структуре КТ выделяются взаимосвязанные подсистемы со сложными структурными и функциональными отношениями, включая обратные связи;
- изолированная оптимизация отдельных подсистем может приводить к конфликтным ситуациям и не обеспечивает системную оптимизацию;
- стохастичность транспортных потоков делает процесс обслуживания заявок вероятностным.

Работа КТ обеспечивается разнородными ресурсами: человеческими, техническими, информационными [7], взаимодействие которых обеспечивает работу КТ и качество ПРУ [7], [8]. Эти ресурсы при моделировании помещаются в позиции сети в виде маркеров, причем маркерам придается вес (размерность) в соответствии с необходимыми для перехода ресурсами.

Рассмотрим структурно-логическую модель функционирования КТ, представленную сетью Петри (рис. 1). Функционирование КТ представляется в виде последовательности событий, основанных на причинно-следственных связях. Задачей данной модели является идентификация конфликтных ситуаций, в которых позиция имеет выходы на два и более перехода.

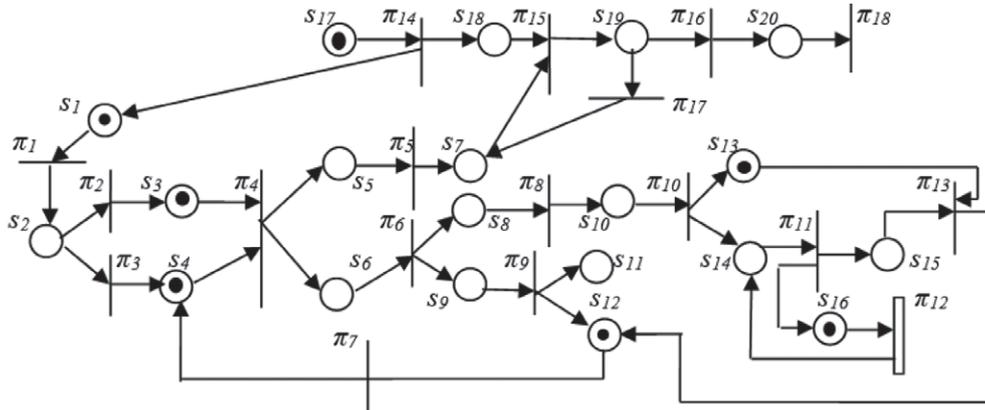


Рис. 1. Имитационная модель контейнерного терминала

- Условные обозначения:  $s_1$  — заявки на ПРУ;  $s_2$  — наличие ресурсов;  $s_3$  — операторы ПТ;  
 $s_4$  — парк ПТ;  $s_5$  — ПТ в работоспособном состоянии;  $s_6$  — ПТ в не работоспособном состоянии;  
 $s_7$  — ПТ готова к работе;  $s_8$  — заявка на ремонт ПТ;  $s_9$  — заявка на резервную единицу ПТ;  
 $s_{10}$  — дефектная ведомость;  $s_{11}$  — резерв ПТ отсутствует;  $s_{12}$  — резерв ПТ;  
 $s_{13}$  — наличие запасных частей (ЗЧ) на складе;  $s_{14}$  — отсутствие ЗЧ на складе;  
 $s_{15}$  — ПТ в ожидании ремонта;  $s_{16}$  — наличие ЗЧ у фирмы-поставщика;  $s_{17}$  — транспортное средство;  
 $s_{18}$  — транспортное средство под погрузку/выгрузку;  $s_{19}$  — транспортное средство погружено;  
 $s_{20}$  — готовность документов;  $\pi_1$  — формирование сменно-суточного плана;  
 $\pi_2$  — обеспечение выхода в смену необходимого количества операторов;  
 $\pi_3$  — планирование необходимого количества ПТ;  $\pi_4$  — приемка оператором ПТ;  
 $\pi_5$  — получение задания на оказание ПРР;  $\pi_6$  — вывод ПТ из эксплуатации;  
 $\pi_7$  — ввод резервной ПТ в эксплуатацию;  $\pi_8$  — диагностика ПТ механиком;  $\pi_9$  — рассмотрение заявки;  
 $\pi_{10}$  — проверка наличия ЗЧ на складе;  $\pi_{11}$  — заказ ЗЧ;  $\pi_{12}$  — доставка ЗЧ;  $\pi_{13}$  — ремонт ПТ;  
 $\pi_{14}$  — прибытие на терминал транспортного средства;  $\pi_{15}$  — оказание ПРР (погрузка / разгрузка);  
 $\pi_{16}$  — оформление транспортных документов выезд за терминал;  
 $\pi_{17}$  — информирование диспетчера об окончании ПРР;  $\pi_{18}$  — убытие транспортного средства с терминала

Из имитационной модели (см. рис. 1) видно, что на безопасность эксплуатации КТ влияют организационные, технологические, технические и информационные процессы. Процессы в пределах переходов  $\pi_{14}$  —  $\pi_{18}$  оказывают влияние на экономическую безопасность. Переходы  $\pi_4$  —  $\pi_{13}$  оказывают влияние как на промышленную, так и экологическую безопасность. Эта часть имитационной модели представляет собой внутренние процессы КТ, которые обеспечивают производство ПРУ, и подлежит анализу и оптимизации. В позиции  $s_1$  (заявка на обслуживание) находится маркер, который имеет некую размерность  $p$  (в зависимости от количества поступивших заявок  $n = n_1, n_2, \dots, n_i$ ). В позиции  $s_3$  маркер имеет размерность  $l$  — по количеству операторов ПТ,  $l > n$ . В позиции  $s_4$  маркер имеет размерность  $n$  — по количеству единиц ПТ. Позиция  $s_{11}$  является тупиковой, что свидетельствует о том, что при отсутствии резерва ПТ терминальный оператор не сможет производить ПРР. Отсутствие временных параметров и средств для фиксации порядка поступления маркеров в позиции не позволяет установить порядок срабатывания переходов. По-

этому в алгоритме имитационного моделирования каждому переходу  $\pi_j$ , который обозначает отдельную производственную операцию, приписывается время его реализации  $\tau_j$ . Значение  $\tau_j$  в ходе имитации может задаваться двояко: либо как среднее выборочное по совокупности статистических данных, либо путем разыгрывания соответствующей эмпирической функции распределения.

Влияние технического состояния ПТ на пропускную способность контейнерного терминала. В зависимости от используемого парка ПТ определяется пропускная способность КТ. Под пропускной способностью КТ понимаем максимальное количество груза, которое можно обработать на КТ за определённый период времени:

$$ПС_{КТ} = \sum_{i=1}^k \frac{\Pi_i}{t_i}, \quad (16)$$

где  $\Pi_i$  — суточная производительность парка ПТ определенного типа,  $t_i$  — время обработки одной грузовой единицы,  $k$  — количество типов ПТ.

ПС зависит от типа и количества ПТ. Надежность парка ПТ обеспечивает скорость обработки ТС. Увеличение парка ПТ позволяет сократить время обработки ТС, но для этого требуются дополнительные капитальные затраты, которые должны быть экономически обоснованы. ПС определяется как функция технологических и экономических параметров и внешних ограничений [9]:

$$ПС = f(Q_{вх}, \Pi_{ПТ}, ПС_{ПП}, V_{КТ}, t_{xp}, P_{ТС}), \quad (17)$$

где  $Q_{вх}$  — входной поток;  $\Pi_{ПТ}$  — производительность перегрузочной техники;  $ПС_{ПП}$  — пропускная способность подъездных коммуникаций;  $V_{КТ}$  — емкость КТ (в TEUs (транспортная условная единица, эквивалент 20-футового контейнера), м<sup>3</sup>, т и т. п.):

$$V_{КТ} = (F_{КТ}h)f_{гр}, \quad (18)$$

где  $F_{КТ}$  — полезная площадь КТ, т. е. площадь занятая под хранение груза (данный параметр зависит от типа ПТ и геометрических размеров КТ);  $h$  — высота складирования груза (данный параметр зависит от типа ПТ);  $f_{гр}$  — площадь, занимаемая единицей груза;  $t_{xp}$  — время хранения контейнера,  $t_{xp} = f(t_{xp,дор}, P_{ТС})$ ;  $P_{ПП}$  — ритмичность ППП;  $P_{ТС}$  — ритмичность подачи ТС.

Производительность перегрузочной техники ( $\Pi_{ПТ}$ ) — фактор, который может выступать как объект оптимизации. Она определяется конструктивными особенностями и техническим состоянием. Поддержание ПТ в работоспособном состоянии обеспечивается системой управления технической эксплуатацией (СУТЭ) ПТ, основной задачей которой является проведение мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособного состояния ПТ. Функционирование СУТЭ представляется в виде последовательности событий, основанных на причинно-следственных связях. Важной целью такого структурно-логического моделирования является идентификация конфликтных ситуаций (рис. 2).

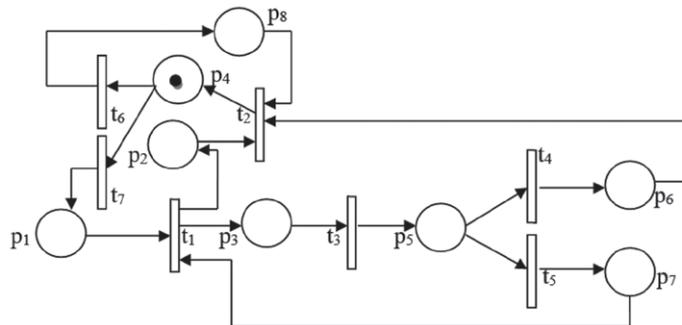


Рис. 2. Модель управления качеством ремонта ПТ

Условные обозначения:  $p_1$  — ПТ поставлена на диагностику;  $p_2$  — контролируемые параметры в заданных пределах;  $p_3$  — контролируемые параметры имеют отклонения;  $p_4$  — ПТ в эксплуатации;  $p_5$  — решение по техническим воздействиям;  $p_6$  — параметры в норме;  $p_7$  — ПТ отремонтирована;  $p_8$  — ПТ выведена на ТО;  $t_1$  — диагностика ПТ;  $t_2$  — проведение ТО;  $t_3$  — анализ отклонений параметров;  $t_4$  — настройка параметров;  $t_5$  — ремонт ПТ;  $t_6$  — наработка ПТ моточасов на ТО;  $t_7$  — наработка ПТ в моточасах на отказ

Если работу СУТЭ рассматривать без учёта реального времени, а только с позиций причинно-следственных связей, то СУТЭ можно рассматривать как конвейерную систему. Основной задачей модели конвейерной системы является проверка моделируемого ею процесса. В конвейерной системе каждый запуск должен быть обязательно завершён, и запуск новой операции не может быть разрешён до момента окончания предыдущей операции [10].

СУТЭ представляет собой многокритериальную задачу:

$$(BP, I, C_{T_p}, H_{от}, T_p, P_p, C_k, K_{TT}, R), \quad (19)$$

где  $BP$  — множество вариантов решения;  $R$  — отношение нестрогого предпочтения.

В сети Петри (см. рис. 2) в позиции  $p_4$  маркер имеет размерность  $k$ , где  $k = n$ , а  $n$  — количество однотипных единиц ПТ, которое имеется на КТ.

Конфликты возникают в следующих позициях:  $p_4$  — ПТ находится в эксплуатации, при наработке заданного времени (переход  $t_6$ ), ПТ становится на ТО, переход  $t_7$  будет запущен в случае отказа ПТ. При достижении маркером позиции  $p_5$  решение по техническим воздействиям принимается в зависимости от полученной информации: произвести настройку параметров (переходов  $t_4$ ) или произвести ремонт ПТ для восстановления работоспособности (переход  $t_5$ ). По окончании ремонтных работ (позиция  $p_7$ ) машина диагностируется (переход  $t_1$ ). Если все контролируемые параметры соответствуют требованиям завода-изготовителя (позиция  $p_2$ ), то производится ТО (переход  $t_2$ ) в соответствии с наработкой, и ПТ сдается в эксплуатацию (позиция  $p_4$ ).

В данной сети все переходы временные. Переходы  $t_2, t_6$  имеют нормированное время проведения работ. Переходы  $t_1, t_3, t_4, t_5, t_7$  имеют вероятностные временные параметры, каждому переходу  $t_j$  приписан закон распределения. В сети имеется две конфликтные позиции:  $p_4$  и  $p_5$ . Поскольку маркер имеет размерность в начальной разметке  $k > 1$ , то при определенном срабатывании переходов произойдёт распараллеливание процессов. При  $k > 3$  возможно выполнение одновременно или в произвольном порядке параллельного срабатывания переходов.

**Экологическая безопасность контейнерного терминала.** Проблемы экологической безопасности рассматриваются как применительно к конкретному КТ, так и к конкретной ситуации, так как причинами, оказывающими влияние на экологическую безопасность, могут быть повреждение опасного груза, аварии и инциденты, возникающие в процессе эксплуатации ПТ, разлив масла при проведении ТО и Р. В большинстве случаев аварийные ситуации возникают из-за халатности сотрудников, при отсутствии должного контроля при проведении ежесменного ТО, несвоевременное проведение ТО и Р, отсутствие диагностики ПТ. В процессе эксплуатации ПТ образуются накопление отработанных, экологически опасных материалов (использованные запчасти, масла, резинотехнические изделия), который хранятся на КТ, до момента их утилизации. Для предотвращения их вредного воздействия на окружающую среду (ОС) оборудуются специальные места хранения. Контроль за соблюдением правил хранения и сбора отходов на территории КТ возлагается на сотрудников терминала. Задачами контроля являются соблюдение лимитов образования и условий хранения отходов на территории ТТ и предотвращение загрязнения окружающей среды (почвы, акватории порта, воздушного пространства).

Для решения задач экологической безопасности на КТ выполняются следующие мероприятия [11]: устанавливаются нормы предельно-допустимых воздействий на ОС, устанавливаются объекты КТ, являющиеся источниками загрязнения, разрабатывается и проводится комплекс мероприятий по снижению загрязнений до предельно-допустимых значений и ниже. Нормами предельно допустимых значений по количеству загрязняющих веществ на КТ являются предельно-допустимые концентрации этих веществ в единице объема исследуемой среды (вода, воздух).

Для предотвращения негативных воздействий на ОС на основе математических моделей разрабатываются системы прогнозирования последствий данных воздействий. Для обеспечения экологической безопасности проводятся организационные и технические мероприятия. Под организационными мероприятиями понимаются: разработка документации по экологической безопасности, обучение сотрудников, разработка РТК и ознакомление с ними сотрудников, повышение

квалификации сотрудников и проверка их знаний. Под техническими мероприятиями понимается проведение ТО и Р, складирование, хранение и утилизация отходов, обеспечение защиты ОС от вредных выбросов (аспирация, изготовление кожухов и т. п.).

Формируется банк вероятных аварийных ситуаций  $S = (S_1, \dots, S_n)$ , определяется  $f(x/S_i)$  — плотность вероятности описания  $x$  ситуации при условии, что описание принадлежит ситуации  $S_i$ . Обозначим вероятности возникновения ситуаций через  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , где  $\sum z = 1, z > 0$ . Определим множество решений возникших ситуаций как  $D_d = (D_1, \dots, D_m)$ . Пространство решений  $D$  состоит из  $m + 1$  возможных решений. Для определения предпочтительного решения определяют решающее правило  $\lambda(x)$ , которое может быть представлено как распределение вероятностей на пространстве решений  $D$ .

### Выводы

1. В итоге применения имитационной модели к функционированию контейнерного терминала были получены следующие результаты:

- определены конфликтные ситуации, в которых существует вероятность развития событий по нескольким возможным вариантам;
- определен оптимизирующий параметр  $\tau$  (время восстановления работоспособности ПТ);
- определен объект оптимизации — производительность ПТ;
- показано, что для предотвращения аварийных ситуаций необходимо создание банка вероятных ситуаций и проработка путей их решения, что позволит сотруднику принимать адекватные решения;

2. Причинами аварийных ситуаций, оказывающих влияние на промышленную, экономическую и экологическую безопасность, являются некачественные ремонтные работы и не соблюдение графиков ТО и Р.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляров И. Д. Принятие решения об использовании аутсорсинга на основе оценки его эффекта для предприятия / И. Д. Котляров // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. — 2011. — № 2. — С. 56–63.
2. Курбанов А. Х. Методика оценки целесообразности использования аутсорсинга / А. Х. Курбанов // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 1. — С. 231.
3. Хлебников Д. Аутсорсинг как инструмент снижения затрат и оптимизации бизнес-системы [Электронный ресурс] / Д. Хлебников. — Режим доступа: [http://iteam.ru/publications/strategy/section\\_16/article\\_222](http://iteam.ru/publications/strategy/section_16/article_222) (дата обращения — 31.08.2016).
4. Вишняков О. Аутсорсинг как инструмент реформирования компании [Электронный ресурс] / О. Вишняков, Д. Гайнутдинов. — Режим доступа: <http://citicity.ru/13940/> (дата обращения — 01.09.2016).
5. Юдицкий С. А. Операционно-целевое моделирование динамики развития организационных систем средствами сетей Петри / С. А. Юдицкий // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 114–123.
6. Зуб И. В. Моделирование функционирования транспортного терминала вложенными сетями Петри / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 41–48.
7. Зуб И. В. Информационные технологии повышения эффективности управления контейнерным терминалом / И. В. Зуб // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 6–9.
8. Зуб И. В. Контейнерный терминал как объект управления качеством транспортно-технологических операций / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 35–41.
9. Зуб И. В. Пропускная способность контейнерного терминала как функция технологии управления / И. В. Зуб // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование: сборник трудов Седьмой международной науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 28-30.04.2009. — Т. 16 (2) / под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. — С. 176–181.

10. Руднев В. В. К вопросу об описании конвейерных процессов сетями Петри / В. В. Руднев // Автоматика и телемеханика. — 1985. — № 8. — С. 115–121.

11. Зуб И. В. Транспортный терминал как объект управления экологической безопасностью / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Д. А. Филиппова // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 123–130.

## SIMULATION MODEL FOR SAFETY ASSESSMENT OF MANUAL HANDLING EQUIPMENT

*The paper discusses problems of safe operation of handling equipment at the container terminal (CT). Tasked by the simulation model to identify conflict situations that affect the safety of operation of CT. In the process of operation of CT, there is a probability of occurrence of an accident, incident, failure and damage of handling equipment (HE), which entails the violation of rules of industrial and environmental safety (spillage of fuel, hydraulic oil, etc.). As a result of these circumstances reduces the processing speed of vehicles and the throughput capacity of CT, which leads to economic losses and possible loss of the carriers. In the operation of HE on industrial safety are affected by the following factors: qualifications of the operator HE, the psychophysiological state of the operator, the environment (weather conditions, the condition of the coating of the terminal), traffic vehicles and other HE, the complexity of the operation. Increasing the level of safety is solved through the organization of events (briefings, development of instructions on labor protection of workers and routings, issue orders and instructions, carrying out training with newly hired employees, conducting annual inspections of knowledge, training of employees in the workplace and in educational and training centers) and technical measures (routine maintenance, diagnostics, control over the operation of HE). Infringement of technology of work with dangerous goods can lead to the violation of industrial and environmental safety. Substandard repair of HE leads to violations of industrial, environmental, and economic security. It is noted that in the simulation were obtained the following results: identified conflicts that can develop in several different scenarios; determined by optimizing the parameter  $\tau$  (the restoration time of HE) and the object of optimizing the performance of HE.*

*Keywords: container terminal, operation safety, environmental safety, handling equipment, simulation model, throughput capacity.*

### REFERENCES

1. Kotliarov, I. D. “Decision to use outsourcing, based on an assessment of its effect for the enterprise.” *Vestnik of the Russian State University of Trade and Economy* 2 (2011): 56–63.
2. Kurbanov, A. Kh. “Methods of assessing the value of outsourcing.” *Modern problems of science and education* 1 (2012): 231.
3. Khlebnikov, D. Outsourcing как инструмент снижения затрат и оптимизации бизнес-системы. Web. 31 Aug. 2016 <[http://iteam.ru/publications/strategy/section\\_16/article\\_222](http://iteam.ru/publications/strategy/section_16/article_222)>.
4. Vishnyakov, A., and D. Gainutdinov. Outsourcing как инструмент реформирования компании. Web. 1 Sept. 2016 <<http://citcity.ru/13940/>>.
5. Yuditskii, S. A. “Operational-objective modeling of dynamics of organizational systems development via Petri nets.” *Automation and Remote Control* 69.1 (2008): 105–113.
6. Zub, I. V., and Y. E. Ezhov. “Modeling of functioning of the transport terminal nested Petri nets.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 41–48.
7. Zub, I. V. “Informacionnye tehnologii povysheniya jeffektivnosti upravleniya kontejnernym terminalom.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2009): 6–9.
8. Zub, I. V., and Y. E. Ezhov. “The container terminal as an objekt of management of the quality of transport-tehnologičai operations.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3(19) (2013): 35–41.
9. Zub, I. V. “Propusknaja sposobnost kontejnernogo terminala kak funkčija tehnologii upravlenija.” *Vysokie tehnologii, fundamentalnye issledovanija, obrazovanie: sbornik trudov Sedmoj mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokih tehnologij v promyšlennosti»*. 2830.04.2009, Sankt-Peterburg, Rossija. Vol. 16 (2). SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009: 176–181.
10. Rudnev, V. V. “On description of conveyor-belt processes as Petri nets.” *Automation and Remote Control* 46 (1985): 1027–1032.

11. Zub, I. V., Ju. E. Ezhov, and D. A. Filippova. "Transport terminal as ecological safety regulation object." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova: sbornik nauchnyh statej*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 123–130.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зуб Игорь Васильевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_texp@gumrf.ru*  
*Ежов Юрий Евгеньевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*ezhovye@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Zub Igor Vasilevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*kaf\_texp@gumrf.ru*  
*Ezhov Yyri Evgenevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*ezhovye@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 5 сентября 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-61-68**  
**УДК 624.3**

**М. Н. Кирсанов**

### СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОНТАЖНАЯ СХЕМА ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ

*Предлагается статически определяемая схема плоской фермы решетчатого типа с четырьмя внешними связями, моделируемыми симметрично расположенными опорными жесткими стержнями. Ставится задача определения прогиба конструкции в зависимости от числа панелей, размеров фермы и величины нагрузки, приложенной равномерным образом к узлам верхнего пояса. Усилия в стержнях определяются методом вырезания узлов. В цикле по числу стержней составляется матрица системы уравнений равновесия всех шарниров конструкции. Методом индукции по числу панелей с применением специальных операторов *rgf\_findrecur* и *rsolve* из пакета *Genfunc* системы компьютерной математики *Maple* получена точная формула для прогиба среднего узла нижнего пояса фермы в виде полинома четвертого порядка. Для последовательности коэффициентов формулы выводятся и решаются рекуррентные уравнения восьмого порядка. Кривые зависимости прогиба от числа панелей при фиксированной суммарной нагрузке и длине пролета обнаруживают резкие скачки и горизонтальную асимптоту, зависящую от высоты фермы и соотношения жесткостей стержней поясов и решетки. Обнаружена кинематическая изменчивость фермы при нечетном числе панелей, приводящая к равенству нулю определителя системы уравнений узлов. Построена непротиворечивая схема возможных скоростей изменяемой конструкции и найдены соотношения между скоростями узлов. С целью недопущения изгибных деформаций предлагается метод проектирования монтажа фермы с учетом размещения стержней фермы в отдельных плоскостях. Задача о последовательности крепления стержней в узлах сводится к решению задачи дискретной математики о реберной раскраске графа. Применяются операторы *Graph* и *EdgeChromaticNumber* пакета *GraphTheory* системы *Maple*. Приводится конкретный пример монтажа.*

*Ключевые слова:* ферма, прогиб, аналитическое решение, *Maple*, индукция, реберная раскраска.

#### Введение

Ферма — неотъемлемый элемент конструкций портовых складов, гидротехнических сооружений, портовых кранов, мостов и корпусов кораблей [1] – [4]. Легкие и прочные, сравнительно недорогие и удобные в монтаже, они широко распространены как в строительных, так и судовых конструкциях. Существует множество численных расчетов и специализированных программ