

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРА РЕСУРСОВ НА БАЛТИЙСКОМ КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Ю.А. Меркурьев¹, В.В. Бардаченко², А.В. Соломенников³,
Ф. Камперман⁴*

¹ *Рижский технический университет
Калкю 1, Рига, LV-1658, Латвия
Тел.: +371-7089514. E-mail: merkur@itl.rtu.lv*

² *Рижский технический университет
Калкю 1, Рига, LV-1658, Латвия
Тел.: +371 9118947. E-mail: vladimir.bard@btv.lv*

³ *Институт транспорта и связи
Ломоносова 1, Рига, LV-1019, Латвия
Тел.: +371-9455857. E-mail: andrey.solomennikov@btv.lv*

⁴ *Baltic Container Terminal, Ltd.
Кундзинсала 1, Рига, LV-1822, Латвия
Тел.: +371 7076200. E-mail: fred.kamperman@bct.lv*

В работе решается задача выбора оптимального набора технологических ресурсов на Балтийском контейнерном терминале. Продемонстрирована эффективность применения имитационного моделирования для решения подобных задач.

Ключевые слова: имитационное моделирование, контейнерный терминал, логистическая цепь, технологические ресурсы, оптимизация ресурсов

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемая задача выбора ресурсов заключается в поиске наиболее эффективного (по заданному критерию) набора ресурсных единиц, выполняющих определенную последовательность технологических операций. Так как любая ресурсная единица работает в логистической цепи с остальными задействованными ресурсами, то неизбежные случайные задержки при выполнении элементарных технологических операций, а также очереди транспортных единиц при погрузочно-разгрузочных операциях, приводят к стабилизации общей производительности вокруг некоторой цифры, как правило, существенно отличающейся от индивидуальной производительности каждого из ресурсов.

Очевидно, что верхний предел производительности всей логистической цепи не может превышать производительности ее самого медленного ресурса. Однако эффекты взаимодействия ресурсов зачастую приводят к снижению суммарной производительности. Для оценивания результирующей производительности различных комбинаций ресурсов в работе используется метод имитационного моделирования. Данные, полученные с помощью имитационной модели, позволяют оценить реальную производительность и её статистическое распределение для каждой комбинации рассматриваемых ресурсов, и на этой базе сделать вывод об оптимальном наборе ресурсов.

В данной работе задача выбора оптимального набора ресурсов решается на примере задачи оптимизации набора технологических ресурсов для обработки 40-футовых контейнеров на Балтийском контейнерном терминале (*Baltic Container Terminal*, ВСТ). При этом критерий

оптимальности формулируется в экономических терминах и представляет собой функцию от производительности. В приводимой ниже постановке задачи исследования цены на оборудование были несколько изменены, чтобы не нарушать коммерческую тайну, что, однако, не повлияло на методику решения задачи. Кроме того, разработанный метод решения рассматриваемой задачи оптимизации ресурсов с использованием имитационной модели ВСТ сравнивался с традиционным методом решения таких задач и показал статистически существенно более точный результат. Таким образом, рациональная детализация производственных процессов и их имитационное моделирование дают существенный прирост в точности принимаемых финансовых решений.

Работа выполнена в рамках проекта IST-2001-33030 BALTPORTS-IT "Simulation and IT-Solutions: Applications in the Baltic Port Areas of the Newly Associated States" программы IST Европейской Комиссии.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАЛТИЙСКОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

Балтийский контейнерный терминал (ВСТ) работает на территории Рижского свободного порта. Терминал занимает территорию 76 гектаров. Контейнерный причал имеет длину 420 метров. Движение контейнеров происходит в двух направлениях: импортном и экспортном. Как правило, все контейнеры (как импортные, так и экспортные) в течение некоторого отрезка времени хранятся на соответствующем контейнерном язде.

На рис. 1 показано расположение кранов и ярдов для хранения контейнеров. Портальный кран QC (*quay crane*) может располагаться в одной из позиций А1-А4 контейнерного причала. Ярдовый кран YC (*yard crane*) при разгрузке судна работает в одной из позиций импортного язда G1-G2, а при погрузке занимает одну из позиций H1-H2 экспортного язда. В действительности, в каждой из указанных позиций имеется свой кран, но реально в 85% случаев работает один кран. Тягачи Tr (*trucks*) передвигаются к яздам D, E, F, G, H в соответствии с указаниями диспетчера.

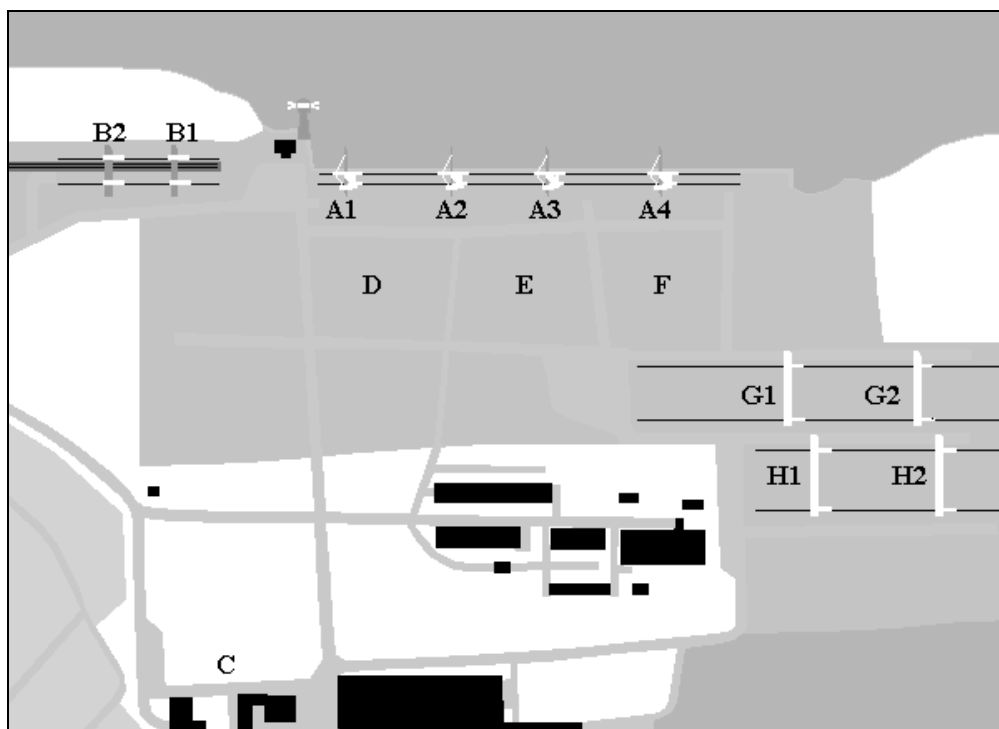


Рис. 1. Фрагмент плана местности ВСТ

Главные ресурсы ВСТ (см. рис. 2):

- контейнерный причал, обслуживаемый тремя портальными подъемными кранами QC,
- 40-футовые ярды, контейнеры которых перемещаются (с тягачей и на тягачи) с помощью установленных на рельсах ярдовых подъемных кранов YC,
- тягачи Tг – внутренние транспортные средства для перемещения контейнеров между причалом и ярдами.

К ресурсам ВСТ можно отнести также железнодорожный центр, использующий установленные на рельсах подъемные краны, и 20-футовые ярды, контейнеры которых перемещаются с помощью вилочных погрузчиков FL (*forklifters*).

В настоящей работе набор ресурсов, подлежащих рассмотрению, состоит только из трех основных видов ресурсов QC, YC и Tг. Эти ресурсы обеспечивают полное функционирование экспортно-импортных операций всех 40-футовых контейнеров терминала, что по общему объему составляет больше половины всех работ, причём портальные краны QC и тягачи TR используются также для всех операций с 20-футовыми контейнерами.

На рис. 3 представлена схема основных технологических операций на терминале. Здесь левая часть рисунка отображает все операции погрузки контейнеров (в том числе временно перемещаемых на сушу с целью освобождения доступа к контейнерам в глубине трюма (*restow*)) и крышек трюма (*hatch covers*) на корабль с указанием (внутри прямоугольников) вида ресурса, задействованного в данной операции. Правая часть рисунка отображает все операции разгрузки контейнеров и крышек трюма с корабля. В центре условно обозначен корабль со всеми объектами, участвующими в разгрузочно-погрузочных операциях.

Как следует из рисунка, портальные краны QC используются во всех работах по разгрузке и погрузке контейнеров на корабль, тягачи Tг не принимают участия лишь в таких работах, как разгрузка и погрузка контейнеров *restow* и крышек трюмов *hatches*, которые по времени выполнения не превышают 5% от общего времени разгрузочно-погрузочных работ. Это указывает на большую важность оптимального выбора этих элементов технологической цепи.

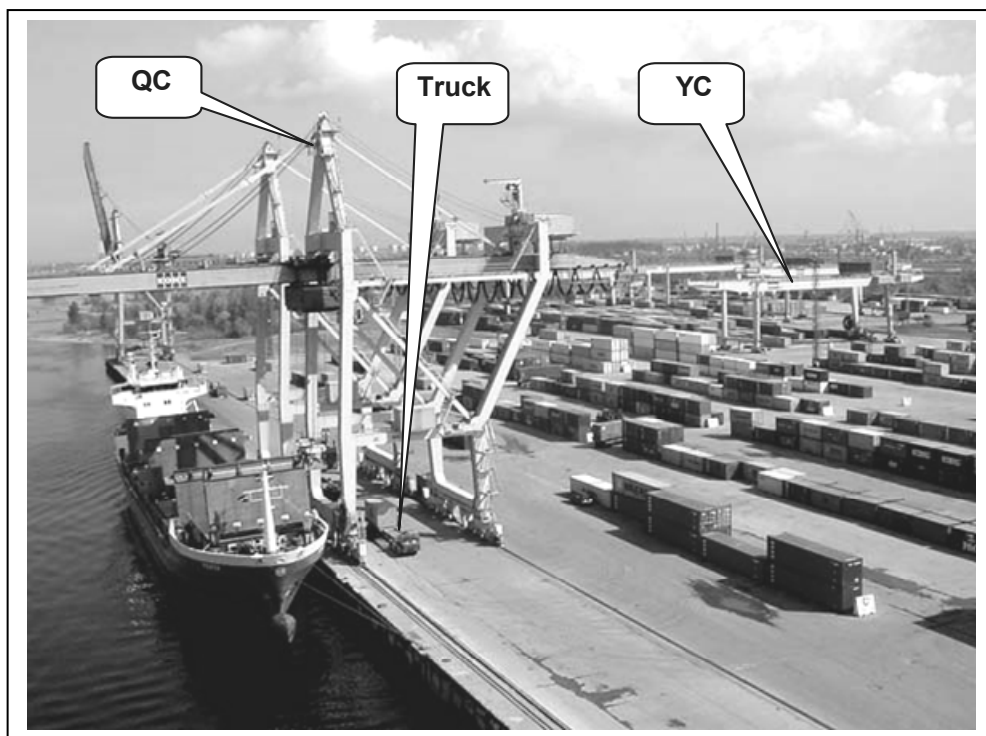


Рис. 2. Общий вид контейнерного терминала ВСТ

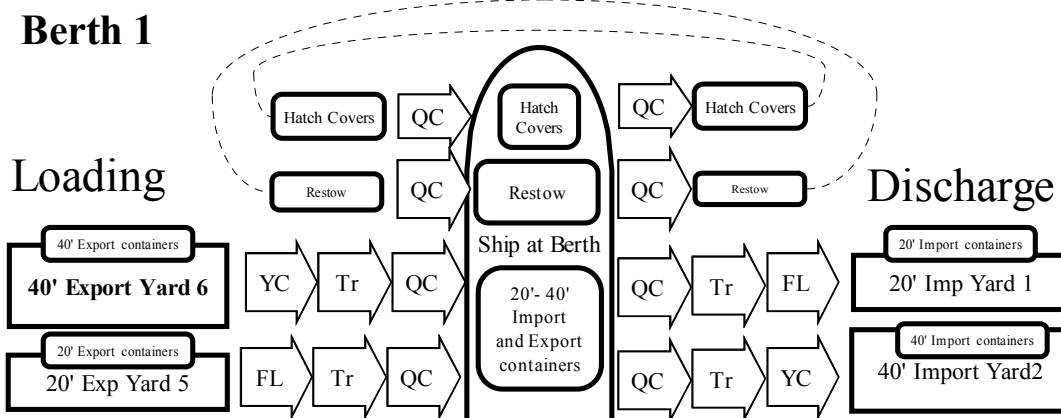


Рис. 3. Блок-схема основных технологических операций при выполнении разгрузочно-погрузочных работ

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рис. 4 иллюстрирует множество связей между ресурсами, которое приходится принимать во внимание при решении рассматриваемой задачи. В определенном смысле это граф взаимосвязей ресурсов, а количество путей этого графа, аналогичных одному из допустимых путей, выделенному на рисунке, определяет множество вариантов решения задачи выбора оптимального набора ресурсов.

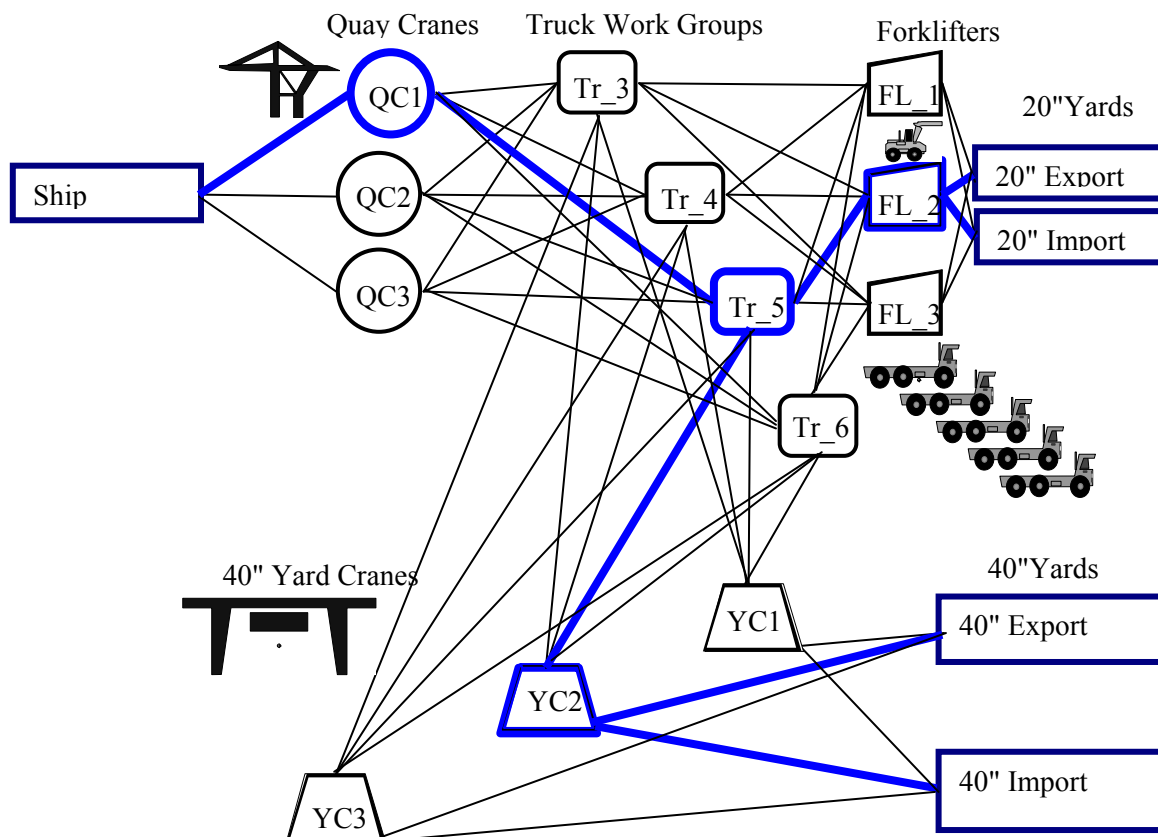


Рис. 4. Граф взаимосвязей ресурсов при анализе их экономической эффективности

2.1. Исходные данные по вариантам использования ресурсов

В задаче рассматриваются:

1. Три порталных крана QC1, QC2 и QC3, отличающиеся стоимостью P_{q1} , P_{q2} , P_{q3} , номинальной производительностью N_{q1} , N_{q2} , N_{q3} (то есть средней длительностью рабочего цикла T_{q1_set} , T_{q2_set} , T_{q3_set}) и сроком эксплуатации L_{q1} , L_{q2} , L_{q3} . Эти данные в компактной форме содержатся в табл. 1.

2. Четыре бригады 3Tr, 4Tr, 5Tr и 6Tr однотипных контейнерных тягачей по 3, 4, 5, и 6 тягачей в каждой бригаде соответственно. Комплекты тягачей здесь имеют соответственно стоимость P_{t1} , P_{t2} , P_{t3} и P_{t4} , среднюю длительность рабочего цикла $T_{t1_set} = T_{t2_set} = T_{t3_set} = T_{t4_set} = 430$ сек. +/- 10% и одинаковый срок эксплуатации $L_{t1} = L_{t2} = L_{t3} = L_{t4}$. Эти данные в приведены в табл. 2.

3. Три яровых крана YC1, YC2 и YC3 для работы с контейнерами в местах их хранения, характеризующиеся стоимостью P_{y1} , P_{y2} и P_{y3} , номинальной производительностью N_{y1} , N_{y2} и N_{y3} (то есть средней длительностью рабочего цикла T_{y1_set} , T_{y2_set} и T_{y3_set}) и сроком эксплуатации L_{y1} , L_{y2} и L_{y3} . Эти данные в компактной форме содержатся в табл. 3.

Кроме того, в табл. 1-3 приведены значения N_{max} соответствующей максимальной производительности ресурсов, измеряемой в "перемещениях в час", рассчитанные исходя из длительностей циклов.

4. Исходные данные по количеству контейнеров, реально обработанных ВСТ и использованных как входы имитационной модели, приведены ниже, на рис. 11-13.

Таблица 1. Основные технико-экономические параметры порталных кранов

Table Res1					
Марка	Цикл, сек	N_{max}	Цена	Срок службы, лет	Амортизация за 1 час работы
QC1	80	45	1000000	15	19.61
QC2	90	40	920000	15	18.04
QC3	98	37	870000	15	17.06

Таблица 2. Основные технико-экономические параметры комплектов тягачей

Table Res2					
Марка	Цикл, сек	N_{max}	Цена	Срок службы, лет	Амортизация за 1 час работы
3Tr	143	25	125000	3	12.25
4Tr	108	33	166700	3	16.34
5Tr	86	42	208000	3	20.42
6Tr	72	50	250000	3	24.51

Таблица 3. Основные технико-экономические параметры яровых кранов

Table Res3					
Марка	Цикл, сек	N_{max}	Цена	Срок службы, лет	Амортизация за 1 час работы
YC1	80	45	875000	15	17.16
YC2	90	40	820000	15	16.08
YC3	110	33	770000	15	15.10

Существует всего 36 вариантов возможного объединения рассмотренных ресурсов в группы (наборы), что и отображено на рис. 4 в 3-х мерном пространстве ресурсных типов, где X – количество тягачей в бригаде, Y – нормативные циклы порталных кранов, Z – нормативные циклы различных ярдовых кранов.

3D Scatterplot (Resource Combinations 3v*36c)

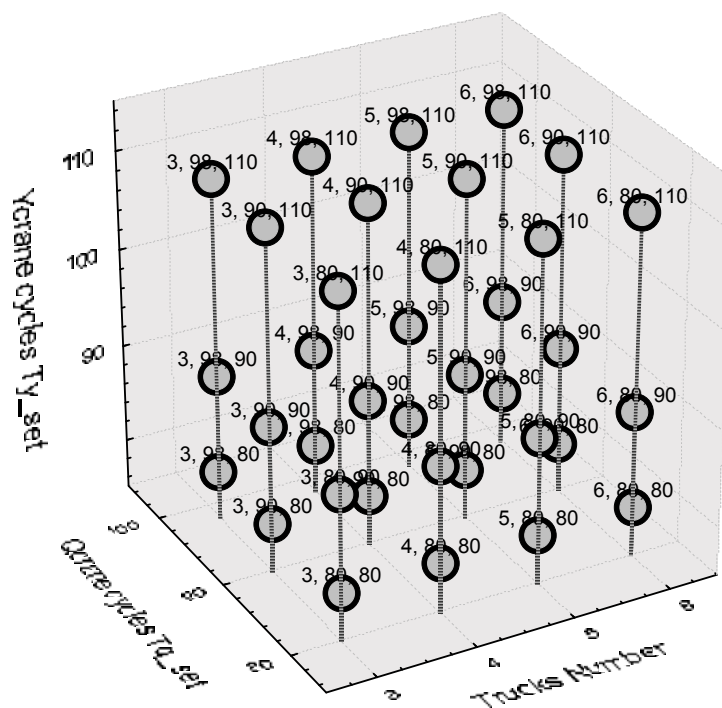


Рис. 4. Множество дискретных вариантов распределения ресурсов по наборам

2.2. Критерий эффективности и задача поиска экономически эффективных решений

Для поиска эффективных решений на множестве возможных комбинаций ресурсов требуется задать функцию определения величины критерия эффективности при испытаниях (на имитационной модели) каждой допустимой комбинации ресурсов. Другими словами, нужно задать алгоритм расчета критерия эффективности, оцениваемого по результатам имитационных испытаний. В данной работе в качестве такого критерия используется чистая приведенная прибыль за один час работы.

В табл. 5 в качестве примера представлен фрагмент данных о затратах, связанных с эксплуатацией единицы ресурса (т.е. конкретного порталного крана, ярдового крана или бригады тягачей) по перемещению одного 40-футового контейнера по логистической цепочке “корабль – импортный ярд” и по обратной цепочке “экспортный ярд – корабль”. Здесь в первой колонке фигурирует производительность NP соответствующего ресурса, измеряемая в количестве перемещенных за 1 час контейнеров (*moves per hour*).

Таблица 5. Структура затрат на эксплуатацию единицы ресурса

Производительность NP, moves/hour	Амортизация, EUR/h	Зарплата, EUR/h	Энергия, EUR/h	Суммарные затраты на ремонт, EUR/h	Общие затраты, EUR/h
1	20	3.125	0.9	0.2	23.8
2	20	3.125	1.8	0.4	24.9
...

С учетом вышесказанного экономическая формулировка задачи может быть представлена в следующем виде.

2.3. Экономическая формулировка задачи

Введем следующие обозначения:

- $STqci, STyci, STtri$ – затраты на амортизацию соответствующего ресурса (т.е. конкретного порталного крана, ярдового крана и бригады тягачей), отнесенные к одному рабочему часу;
- $SSqci$ – зарплата крановщика, управляющего порталным краном, отнесенная к одному рабочему часу ресурса $QC_i, i = 1, 2, 3$;
- $SSyci$ – зарплата крановщика, управляющего ярдовым краном, отнесенная к одному рабочему часу ресурса $YC_i, i = 1, 2, 3$;
- $SStri$ – зарплата всей бригады водителей тягачей, отнесенная к одному рабочему часу ресурса $Tr_i, i = 1, 2, 3, 4$;
- $SENqci$ – затраты на электрическую энергию, отнесенные к одному рабочему часу ресурса $QC_i, i = 1, 2, 3$;
- $SENYci$ – затраты на электрическую энергию, отнесенные к одному рабочему часу ресурса $YC_i, i = 1, 2, 3$;
- $SENtri$ – затраты на топливо, отнесенные к одному рабочему часу ресурса бригады тягачей $Tr_i, i = 1, 2, 3, 4$;
- $SRMqci$ – затраты на ремонт кранов $QC_i, i = 1, 2, 3$, пропорциональные числу движений крана (отражают линейный износ), отнесенные к одному рабочему часу ресурса;
- $SRMyci$ – затраты на ремонт кранов $YC_i, i = 1, 2, 3$, пропорциональные числу движений крана (отражают линейный износ), отнесенные к одному рабочему часу ресурса;
- $SRMtri$ – затраты (бригадные) на ремонт тягачей, $i = 1, 2, 3, 4$, отнесенные к одному рабочему часу ресурса и пропорциональные числу движений крана QC_i , т.е. числу циклов движений, отнесенных ко всей бригаде тягачей;
- $SRTqci$ – затраты на ремонт кранов $QC_i, i = 1, 2, 3$, отнесенные к одному рабочему часу ресурса и возрастающие в степенной зависимости от числа движений крана (отражают ускоренный износ при работе в режимах, превышающих предельно допустимые режимы работы);
- $SRTyci$ – затраты на ремонт кранов $YC_i, i = 1, 2, 3$, отнесенные к одному рабочему часу ресурса и возрастающие в степенной зависимости от числа движений крана (отражают ускоренный износ при работе в режимах, превышающих предельно допустимые режимы работы);
- $SRTtri$ – затраты на ремонт тягачей, $i = 1, 2, 3, 4$, отнесенные к одному рабочему часу ресурса и возрастающие в степенной зависимости от числа движений тягача (отражают ускоренный износ при работе в режимах, превышающих предельно допустимые режимы работы);
- $Sother$ – другие постоянные затраты, отнесенные к одному перемещению контейнера (например, долговые обязательства, плата за аренду земли и др.).

Суммарные затраты $SSS_{ijk}(NP)$, отнесенные к одному рабочему часу по каждому виду ресурса $i(i = 1, 2, 3.)$, $j(j = 1, 2, 3.)$, $k(k = 1, 2, 3, 4.)$, нелинейно зависят от производительности NP всей логистической цепи:

$$SSS_{ijk}(NP) = STqci + SSqci + SENqci(NP) + SRMqci(NP) + SRTqcj(NP) + STycj + SSycj + SENycj(NP) + SRMycj(NP) + SRTycj(NP) + STtrk + SStrk + SENtrk(NP) + SRMtrk(NP) + SRTtrk(NP). \quad (1)$$

Для каждой рассматриваемой комбинации ресурсов экономический критерий эффективности можно представить как разность между доходом $P(NP)$ за 1 час, (пропорциональным плате за прохождение контейнера, умноженной на производительность NP) и соответствующими суммарными затратами:

$$CRITERION_{ijk}(NP) = P(NP) - SSS_{ijk}(NP) - Sother. \quad (2)$$

Теперь формально рассматриваемая задача состоит в поиске такого набора ресурсов, который доставляет максимум критерию (2), а именно:

$$Maximum [CRITERION_{ijk}(NP)] = Cmax_{u,v,w} \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4$

где u, v, w – конкретные индексы ресурсов, доставляющие максимум критерию (2).

Собственно говоря, задача состоит не столько в поиске максимума как такового, сколько в поиске конкретных ресурсов, при которых и достигается максимум критерия эффективности.

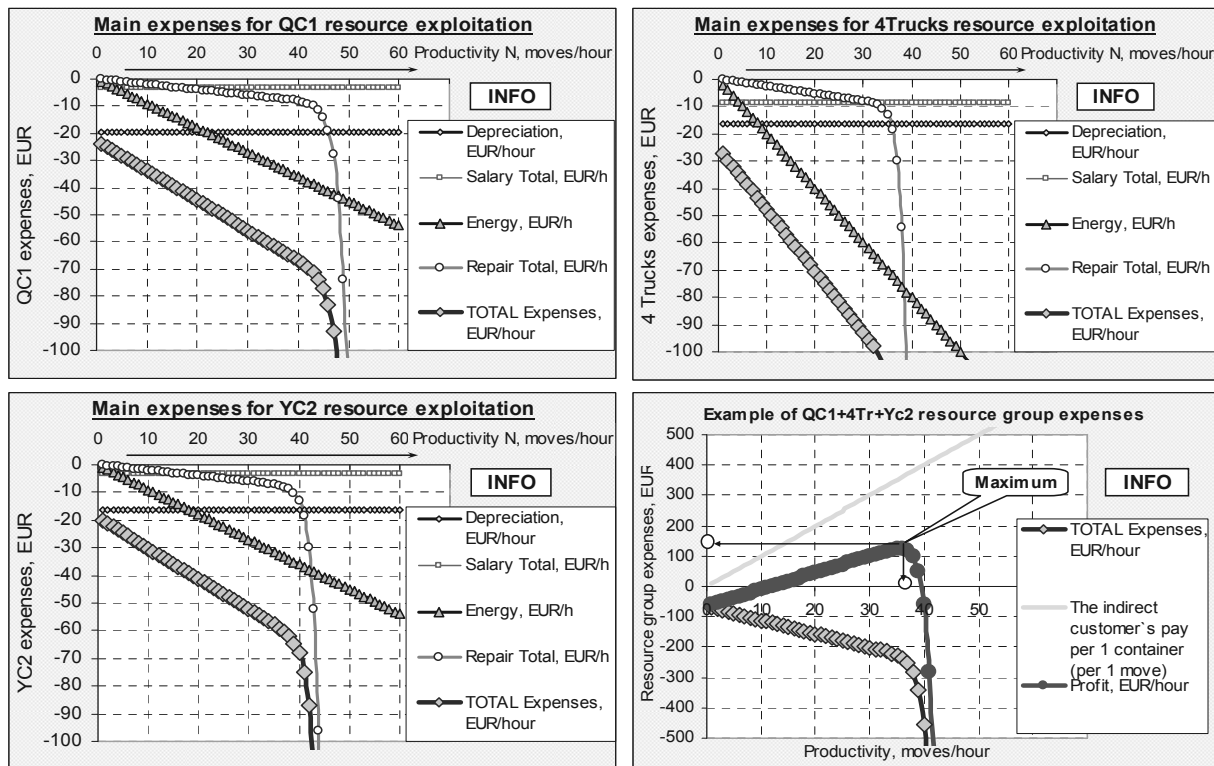


Рис. 5. Пример анализа затрат для набора ресурсов QC1 + 4Tr + YC2

Примеры зависимостей, содержащихся в таблицах типа табл. 5, а также характер поведения критерия (2) при изменении производительности NP, приведены в графической форме на рис. 5. Здесь представлены графики составных частей затрат для каждого отдельного ресурса (графики слева и справа вверху) и характер зависимостей доходов и затрат SSS122 для

комбинации порядковых номеров ресурсов 122 (зеленая и синяя линия на нижнем правом графике) в зависимости от производительности NP. Красная линия показывает превышение доходов над расходами в зависимости от производительности NP, максимум которого достигается при $NP = 37$.

Затраты на амортизацию и зарплату практически не зависят от изменения скорости движения в пределах +/- 15% от номинальной и поэтому приняты как постоянные величины, хотя и разные для каждого отдельного ресурса. Затраты на электроэнергию и топливо растут, естественно, пропорционально числу движений. Наконец, затраты на ремонт были разделены на две основные составляющие: пропорциональную и степенную. Первая отражает линейный рост затрат пропорционально износу или, в данном случае, числу движений. Степенная составляющая отражает тот факт, что превышение допустимой скорости работы механизма приводит не только к резко возрастающему износу, но и повышает вероятность поломки оборудования, что и становится причиной резкого увеличения издержек. Сумма этих двух составляющих затрат на ремонт как раз и отражает резкий рост издержек при сверхнормативной эксплуатации ресурсов.

2.4. Имитационная модель ВСТ

Для расчета производительности ВСТ в работе использовалась имитационная модель логистических процессов на терминале, разработанная в программной среде ARENA 5.0 [1]. ARENA является мощным средством имитационного моделирования сложных систем, в частности, хорошо приспособленным для моделирования логистических систем. Модель здесь строится из блоков, описывающих элементарные составляющие описываемых процессов (например, задержки на время транспортирования), что обеспечивает удобство интерпретации создаваемых моделей. Кроме того, ARENA обладает развитыми графическими возможностями, что позволяет широко использовать визуализацию моделируемых процессов.

В ходе разработки имитационной модели ВСТ процессы обработки контейнеров рассматривались на уровне микроопераций. В качестве примера на рис. 6 представлены микрооперации процесса разгрузки корабля.

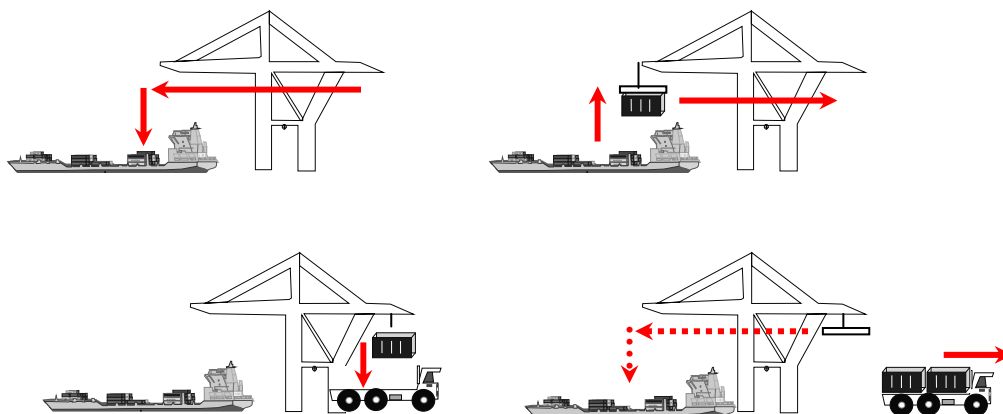


Рис. 6. Микрооперации процесса разгрузки корабля

Затем строились блок-схемы функционирования ресурсов, участвующих в процессе обработки контейнеров, которые в дальнейшем реализовывались средствами ARENA 5.0. Например, на рис. 7 приведена блок-схема работы портального крана.

Подробное описание имитационной модели ВСТ приводится в [2]. На рис. 8 приведен фрагмент визуализации работы этой модели.

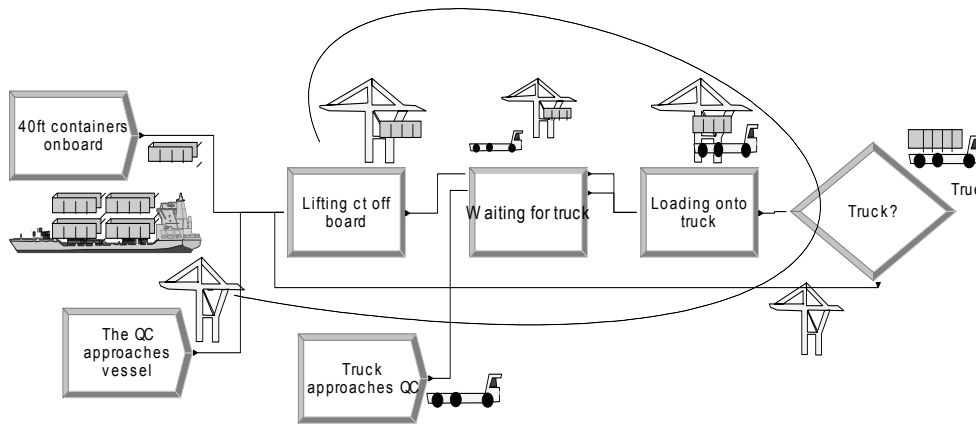


Рис. 7. Блок-схема работы портального крана

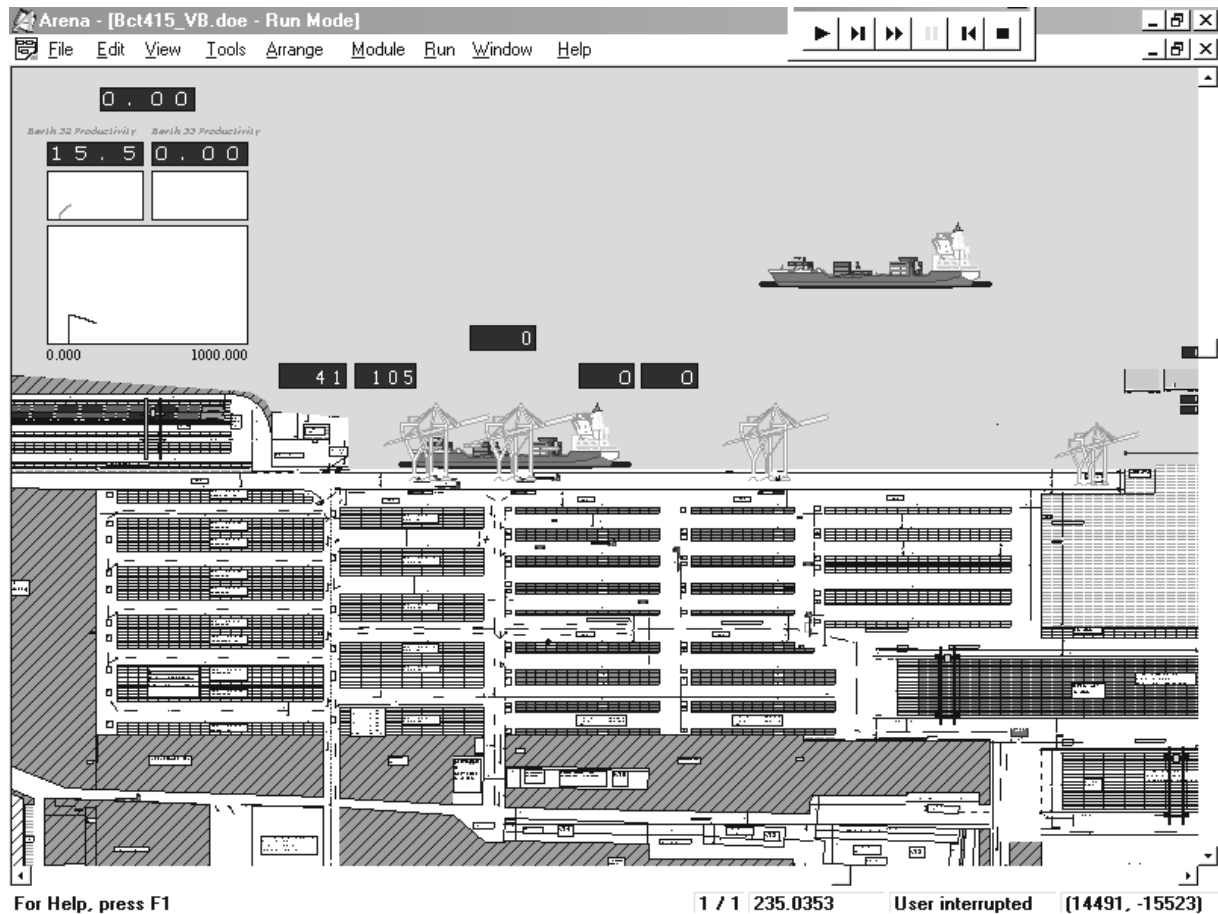


Рис. 8. Фрагмент визуализации имитационной модели ВСТ

На рис. 9 приводится пример визуализации результатов моделирования. В частности, здесь предусмотрена возможность управления имитационным экспериментом (с помощью активизации конкретных ресурсов путем "включения" соответствующих светофоров в левой верхней части рисунка), а также показано количество контейнеров на борту корабля, текущая производительность разгрузочных и погрузочных операций и динамика использования ресурсов.

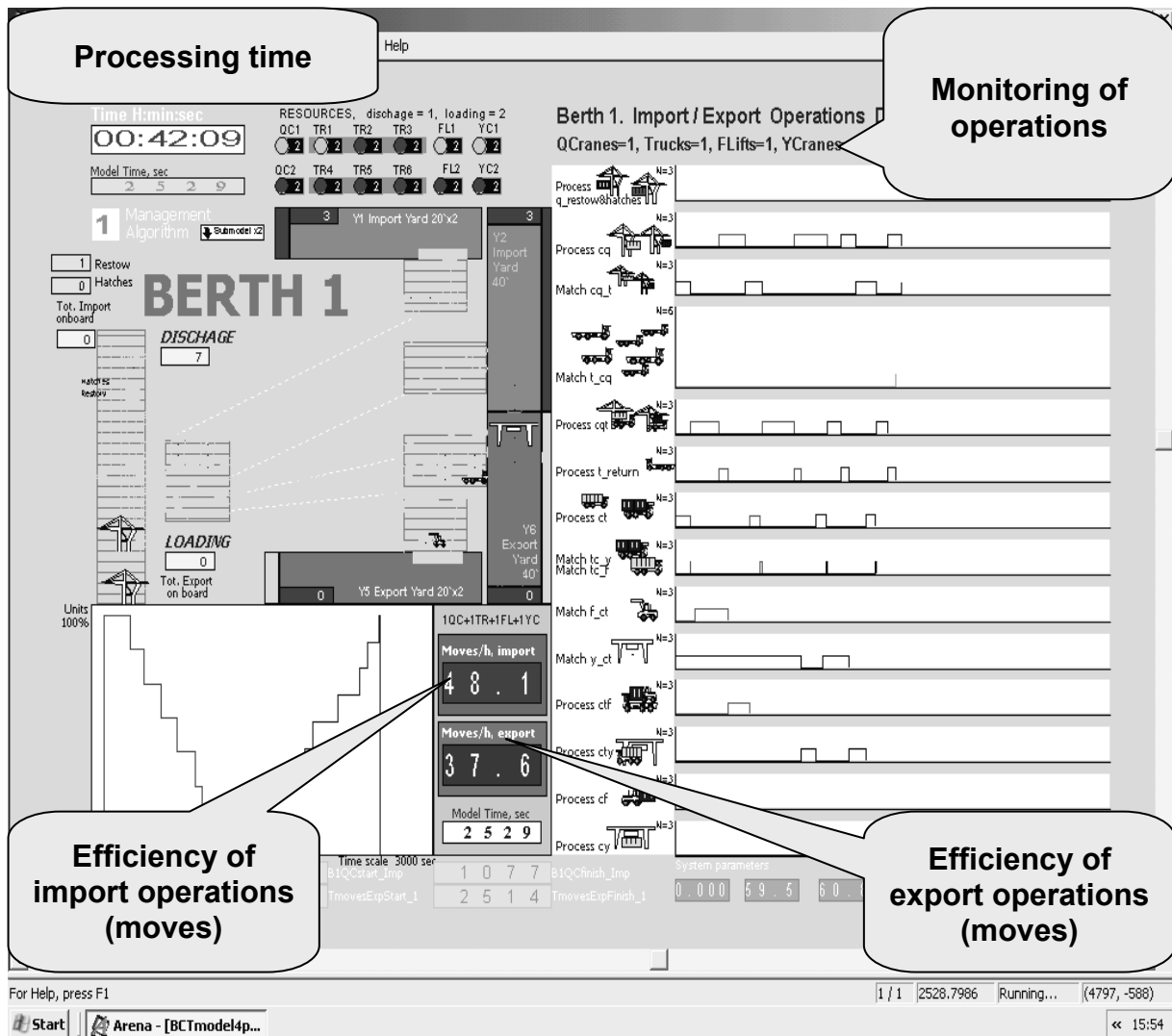


Рис. 9. Пример визуализации результатов моделирования

2.5. Расчет значений критерия эффективности

Критерий эффективности использования той или иной комбинации ресурсов может быть рассчитан как разность между доходом, получаемым терминалом за 1 час при данной производительности (за вычетом, естественно, средних издержек, отнесенных к одному часу), и затратами, структурированными в табл. 5. Теперь для получения численных результатов остается подставить в имитационную модель каждый набор ресурсов и провести статистическое моделирование (в нашем случае включающее прогон через модель 154 кораблей) с мониторингом текущих значений производительности. Случайные количества контейнеров на кораблях моделируются генераторами случайных чисел, распределение каждого из которых соответствует реальному распределению контейнеров данного типа. Затем подставим найденные из модели значения производительностей в таблицы затрат по эксплуатации ресурсов, задействованных в каждом конкретном случае. Суммарные затраты вычитаются из дохода, получаемого терминалом за час при данной производительности, что и дает значение подлежащего оптимизации критерия эффективности.

Таким образом, мы сможем получить множество значений критерия эффективности (для различных наборов ресурсов) и выбрать отсюда оптимальное решение. Описанная схема

использования имитационного моделирования для оценивания производительности, достигаемой каждым набором ресурсов, проиллюстрирована на рис. 10.

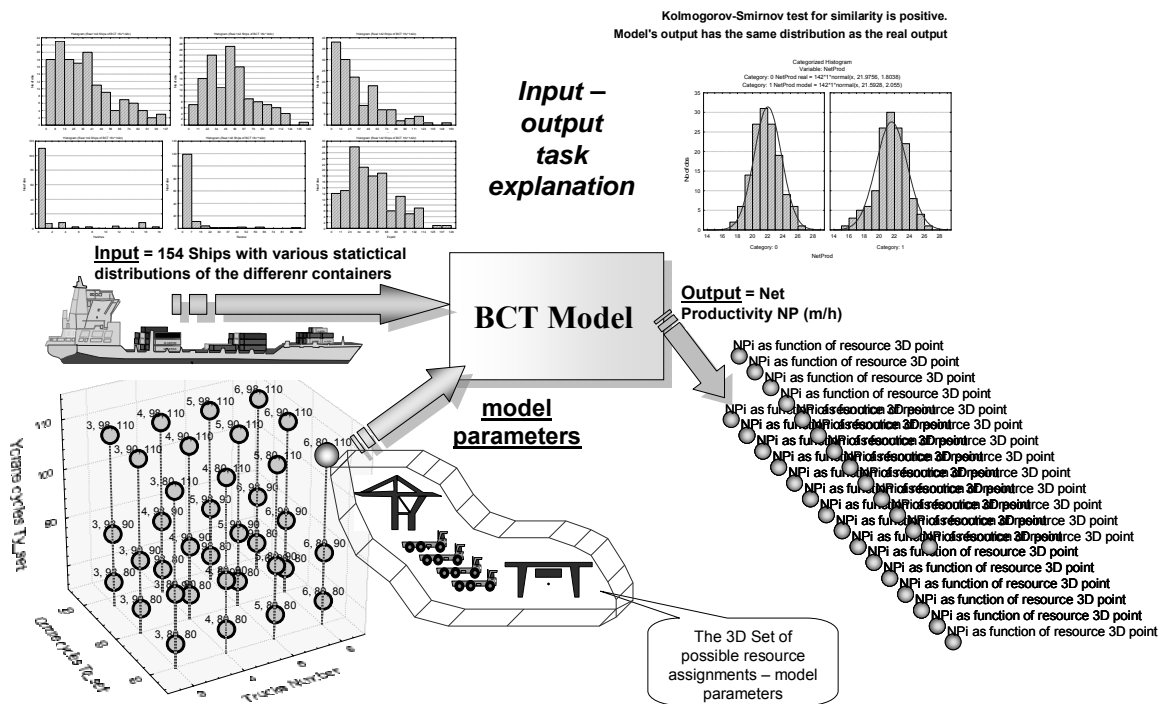


Рис. 10. Схема определения оптимального набора ресурсов

На рис. 10 входами модели служат реальные вероятностные распределения контейнеров (вверху слева) на кораблях, приходящих на ВСТ. Параметрами модели в процессе анализа (по статистике из 154 кораблей) служат соответствующие наборы ресурсов, состоящие из портового крана одной из 3-х рассматриваемых марок, из бригады тягачей различного состава (от 3-х до 6 тягачей в бригаде) и из ярдового крана одной из 3-х фирм. Выходными данными служат наблюдения достигнутой производительности по каждому из 154 кораблей, обслуженных заданным набором ресурсов. Вверху справа приведены для сравнения 2 гистограммы: гистограмма реальных значений производительности из базы данных терминала и гистограмма, полученная (для соответствующего набора ресурсов) посредством моделирования. Тест Колмогорова-Смирнова подтвердил их статистическую идентичность, что свидетельствует об адекватности используемой имитационной модели.

3. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ВАРИАНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ

В соответствии с описанной выше схемой исследования было проведено $3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$ серий имитационных экспериментов с моделью ВСТ при разных комбинациях ресурсов. В каждой серии через модель прогонялись 154 корабля и фиксировалось соответственно 154 значения производительности. При этом на каждом корабле число контейнеров разных типов моделировалось генераторами случайных чисел по распределениям вероятностей, соответствующим реально наблюдаемым гистограммам обработанных портом контейнеров. На рис. 11-13 для сравнения приведены реальные (слева) и генерируемые моделью (справа) гистограммы.

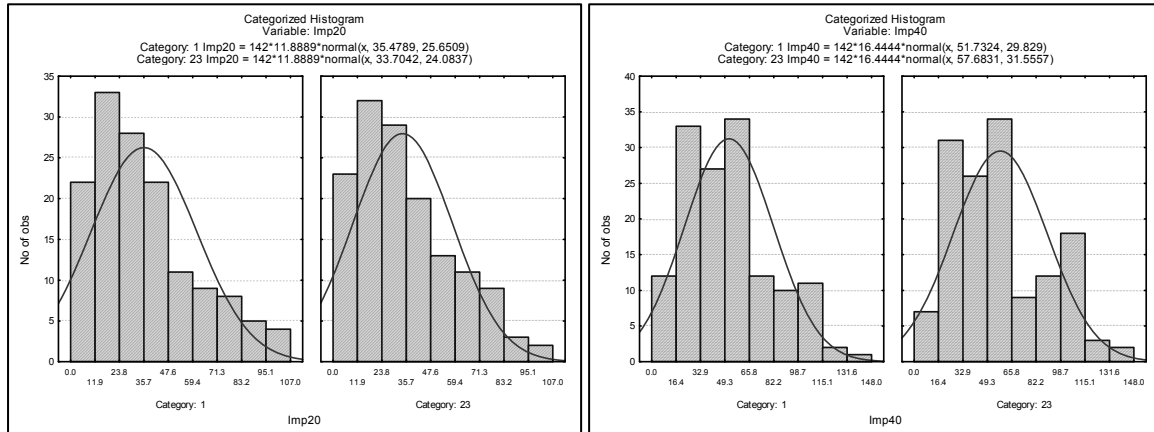


Рис. 11. Гистограммы распределения числа 20-футовых (слева) и 40-футовых (справа) импортных контейнеров на приходящих кораблях и генерируемые моделью гистограммы соответствующих величин (в правой части каждой пары)

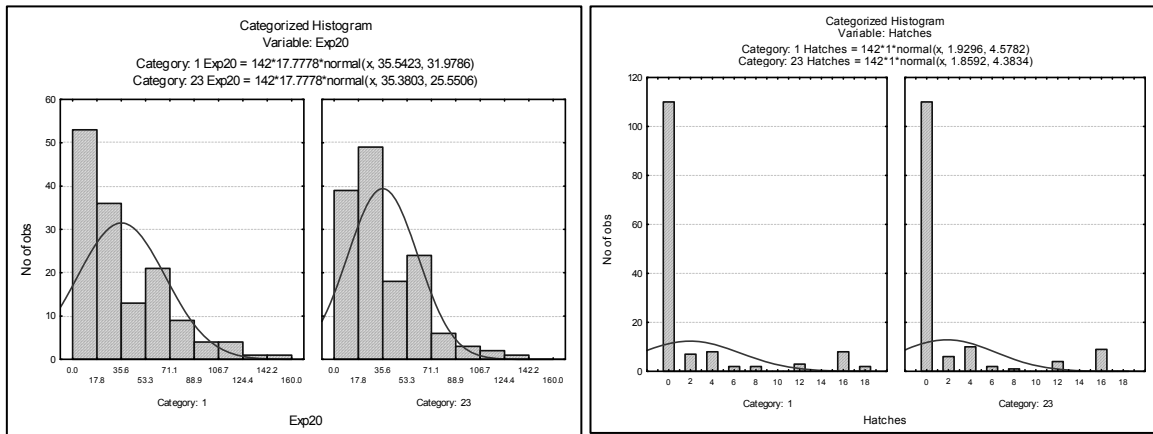


Рис. 12. Гистограммы распределения числа 20-футовых экспортных контейнеров (слева) и крышек трюма кораблей hatches (справа) и генерируемые моделью гистограммы соответствующих величин (в правой части каждой пары)

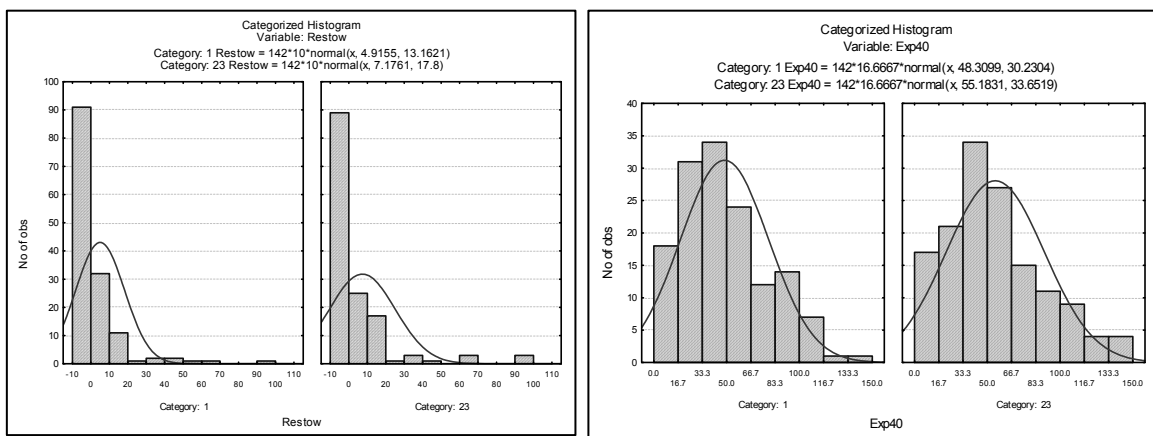


Рис. 13. Гистограммы распределения числа временно перемещаемых на сушу контейнеров restow (слева) и 40-футовых экспортных контейнеров (справа) и генерируемые моделью гистограммы соответствующих величин (в правой части каждой пары)

На рис. 14 приведены гистограммы статистических распределений наблюдаемой и смоделированной производительностей терминала. Адекватность имитационной модели подтверждена тестом Колмогорова-Смирнова, который не выявил между ними значимых статистических отличий.

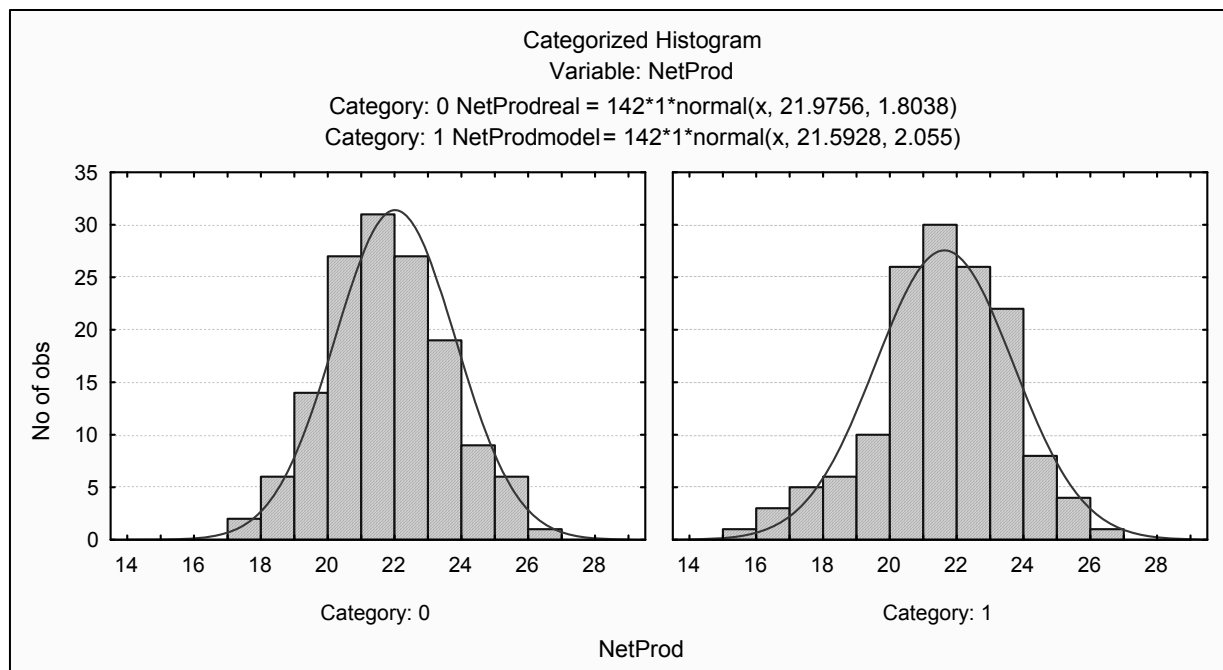


Рис. 14. Гистограммы распределения реальной производительности (левый график, выборка из 154 наблюдений) и производительности, полученной с помощью имитационного моделирования (правый график, выборка также из 154 наблюдений)

Необходимо обратить внимание на следующее важное обстоятельство. В реальности ни один ресурс не работает строго с заданной номинальной производительностью. Для получения реалистичных результатов моделирования значения циклов каждого ресурса менялись случайным образом (равномерно) в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения. Таким образом, номинальные значения задавали математические ожидания равномерно распределенных случайных величин циклов ресурсов. При таком подходе к моделированию отпадает необходимость в специальной проверке полученного решения на устойчивость, так как анализ гистограмм полученных решений дает информацию как по устойчивости решений, так и по их чувствительности к вариациям параметров ресурсов.

Отметим, что наблюдаемые с помощью модели циклы ресурсов уже не являются равномерно распределенными случайными величинами. Дело в том, что время ожидания в очередях является случайной величиной с распределением, весьма отличающимся как от равномерного, так и от нормального распределения. К тому же это время ожидания в нашем исследовании не являлось достаточно малым, чтобы им можно было пренебречь. В результате время ожидания оказало существенное влияние на циклы ресурсов, полученные по результатам моделирования.

Обратимся к анализу взаимосвязей между параметрами модели (число тягачей и циклы ресурсов в левой половине табл. 7) и значениями производительности, затрат и критерия эффективности, полученными посредством моделирования (правая половина табл. 7).

Таблица 7. Фрагмент итоговой таблицы результатов моделирования

Parameters						Outputs				
Trucks	Tt_set	Ty_set	Tq_set	Tq_out	Ty_out	NP	QC_cost	Trucks_cost	YC_cost	Criterion
4	430	110	80	88	104	29.0	54.6	90.9	50.2	94.4
6	430	90	80	84	85	36.7	63.1	162.3	59.6	81.6
5	430	110	90	91	109	28.5	52.5	112.0	49.6	70.5
3	430	90	80	110	91	25.5	50.8	63.9	47.3	93.4
4	430	80	80	94	80	28.0	53.5	88.5	51.1	86.7
3	430	80	90	89	79	22.1	45.5	56.5	44.6	74.8
4	430	110	90	97	114	27.4	51.3	87.2	48.5	87.2
5	430	110	80	99	106	27.0	52.5	108.0	48.0	62.0
6	430	110	98	98	111	26.9	49.7	128.9	47.8	42.1
5	430	90	80	81	89	34.6	60.8	129.3	57.3	98.4
3	430	90	98	107	90	23.6	46.2	59.1	45.2	85.7

4. АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ

Математические ожидания значений критерия для разных комбинаций исследуемых ресурсов приведены в табл. 8-11.

Таблица 8. Математические ожидания значений критерия эффективности (в EUR) для случая бригады из 3-х тягачей

Trucks 3				
Average of Criterion		YC1	YC2	YC3
Tq_set \ Ty_set		80	90	110
QC1	80	77	78	76
QC2	90	78	78	77
QC3	98	78	78	83

Для бригады из 3-х тягачей наибольшее среднее значение критерия составило 83 EUR за один час, достигаемое для наименее производительных кранов QC3, YC3. Заметим, что бригада из 3-х тягачей также является наименее производительной среди рассматриваемых транспортных бригад.

Таблица 9. Математические ожидания значений критерия эффективности (в EUR) для случая бригады из 4-х тягачей

Trucks 4				
Average of Criterion		YC1	YC2	YC3
Tq_set \ Ty_set		80	90	110
QC1	80	88	85	77
QC2	90	87	86	78
QC3	98	85	85	87

Для бригады из 4-х тягачей наибольшее среднее значение критерия составило уже 88 EUR за один час, достигаемое для наиболее производительных кранов QC1, YC1. Это почти

на 6 % больше, чем в предыдущем случае. Интересно, что добавление в предыдущую бригаду из 3-х тягачей ещё одного тягача резко меняет требования к производительности кранов.

Таблица 10. Математические ожидания значений критерия эффективности (в EUR) для случая бригады из 5-ти тягачей

Trucks 5				
Average of Criterion		YC1	YC2	YC3
Tq_set \ Ty_set		80	90	110
QC1	80	82	78	62
QC2	90	80	78	64
QC3	98	75	75	64

Добавление в предыдущую бригаду из 4-х тягачей ещё одного тягача не меняет требования к производительности кранов. Максимум среднего значения критерия, равный 82 EUR, также приходится на самые производительные краны QC1, YC1. Это почти на 7 % меньше, чем в предыдущем случае.

Таблица 11. Математические ожидания значений критерия эффективности (в EUR) для случая бригады из 6-ти тягачей

Trucks 6				
Average of Criterion		YC1	YC2	YC3
Tq_set \ Ty_set		80	90	110
QC1	80	67	59	43
QC2	90	60	59	44
QC3	98	52	53	44

Наконец, бригада из 6 тягачей уже не может улучшить ситуацию, и даже с наиболее производительными кранами значения критерия эффективности не превышают 67 EUR, что почти на 18 % меньше, чем в предыдущем случае.

Таким образом, глобальный оптимум был достигнут для бригады из 4-х тягачей, где наибольшее среднее значение критерия эффективности составило 88 EUR за один час для наиболее производительных кранов QC1 и YC1.

Казалось бы, поиск максимального значения критерия эффективности и соответствующего ему набора ресурсов успешно завершён, однако вероятностный механизм имитационного моделирования обуславливает некоторую неопределенность результата. Математические ожидания значений критериев в вышеприведенных таблицах получены по выборкам из 154 наблюдений в каждой, поэтому они представляют собой случайные величины, распределенные в соответствии с некоторым вероятностным законом. Без соответствующего анализа гистограмм и проверки их на нормальность не представляется возможным применить стандартные процедуры статистического анализа для вычисления интервалов неопределенности математических ожиданий критерия эффективности и уверенного выбора наибольшего из них. Например, при 4-х тягачах комбинации кранов QC2 + YC1 и QC3 + YC3 дают одинаковые значения критерия, равные 87 EUR, что отличается от максимального значения, равного 88 EUR, всего на один процент.

Таким образом, по крайней мере три комбинации ресурсов претендуют на оптимальность. Для окончательного выбора необходимо провести более детальный анализ результатов моделирования.

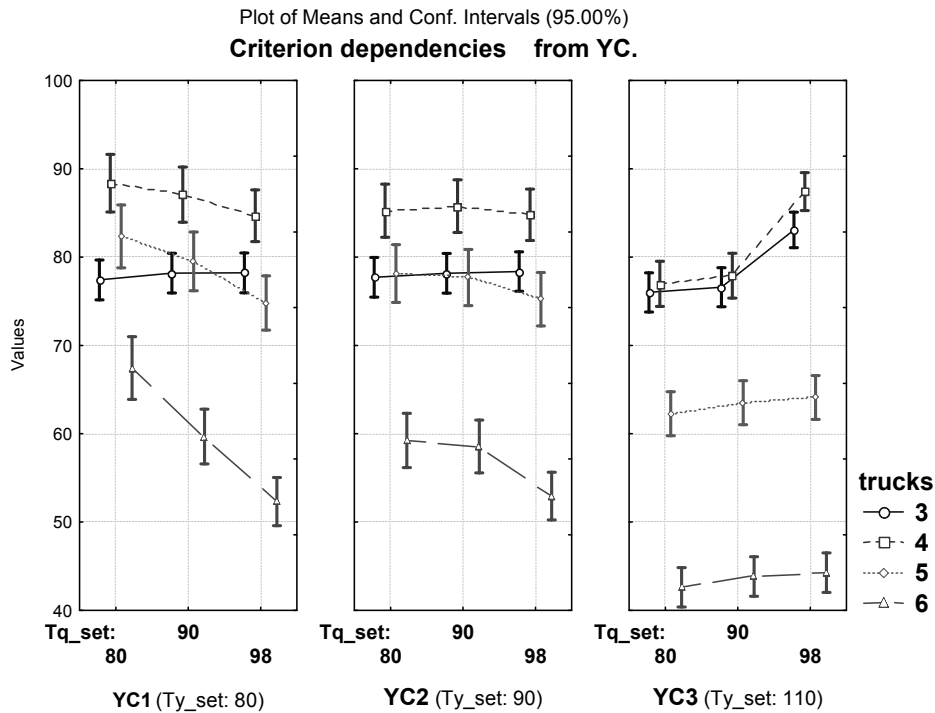


Рис. 15. 95% доверительные интервалы критерия эффективности

На рис. 15 представлены данные совместного анализа средних значений критерия эффективности и их 95% доверительных интервалов для всех рассматриваемых комбинаций ресурсов. Из рисунка следует, что 7 комбинаций кранов со средними значениями критерия выше 80 EUR требуют ещё более детального анализа, так как их доверительные интервалы перекрываются, что не позволяет вынести твёрдое суждение о предпочтительности той или иной комбинации ресурсов.

Для такого анализа вначале отберём возможных претендентов, то есть те наборы ресурсов, которые имеют близкие к максимальному средние значения критерия эффективности. Для этого соберем вместе данные из ранее приведенных таблиц и отсортируем их в порядке убывания значения критерия. В результате получим представленную на рис. 16 зависимость. Здесь по оси абсцисс отложены номера комбинаций ресурсов, расположенные в порядке убывания средних значений критерия оптимальности, а по оси ординат отложены собственно значения критерия.

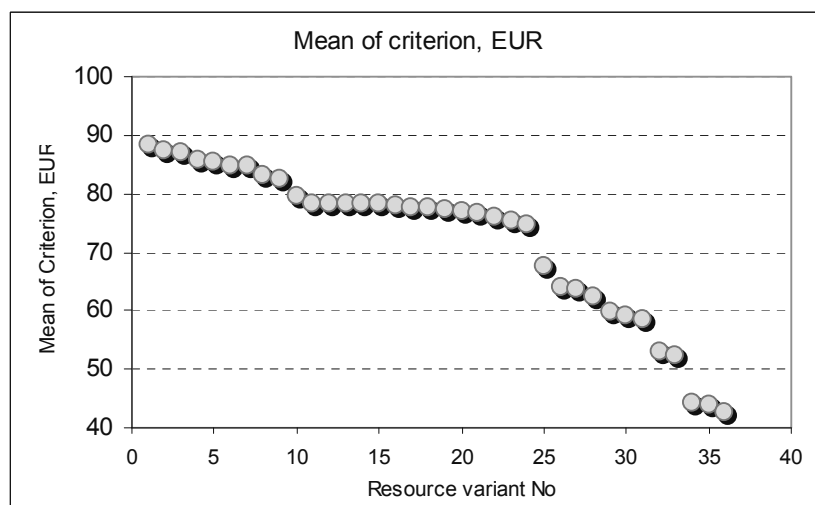


Рис. 16. Ранжированные средние значения критерия оптимальности

Из рисунка следует, что наиболее вероятными в плане оптимальности претендентами являются первые 9 вариантов (см. табл. 12), которые мы и отберем для детального анализа их гистограмм.

Таблица 12. Комбинации ресурсов с наибольшими средними значениями критерия

Var No	Trucks	Tq_set	Ty_set	Combination Name	Mean of criterion, EUR
1	4	80	80	Tr=4, QC80, YC80	88
2	4	98	110	Tr=4, QC98, YC110	87
3	4	90	80	Tr=4, QC90, YC80	87
4	4	90	90	Tr=4, QC90, YC90	86
5	4	80	90	Tr=4, QC80, YC90	85
6	4	98	90	Tr=4, QC98, YC90	85
7	4	98	80	Tr=4, QC98, YC80	85
8	3	98	110	Tr=3, QC98, YC110	83
9	5	80	80	Tr=5, QC80, YC80	82

5. АНАЛИЗ ГИСТОГРАММ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

На рис. 17 приведены гистограммы значений критерия эффективности для отобранных комбинаций ресурсов. Как видим, все они имеют ярко выраженную асимметрию, что не позволяет использовать методы обработки информации, предполагающие нормальность распределения. Кроме того, небольшие различия в математических ожиданиях существенно меньше величин дисперсий, что значительно затрудняет принятие однозначного решения.

Так как вид рассматриваемых распределений не является нормальным, и он нам неизвестен, обратимся к непараметрическим методам статистики. Требуется формально решить, существенны ли наблюдаемые различия средних значений критерия эффективности для разных комбинаций ресурсов, либо же эти различия объясняются ограниченностью выборки наблюдений.

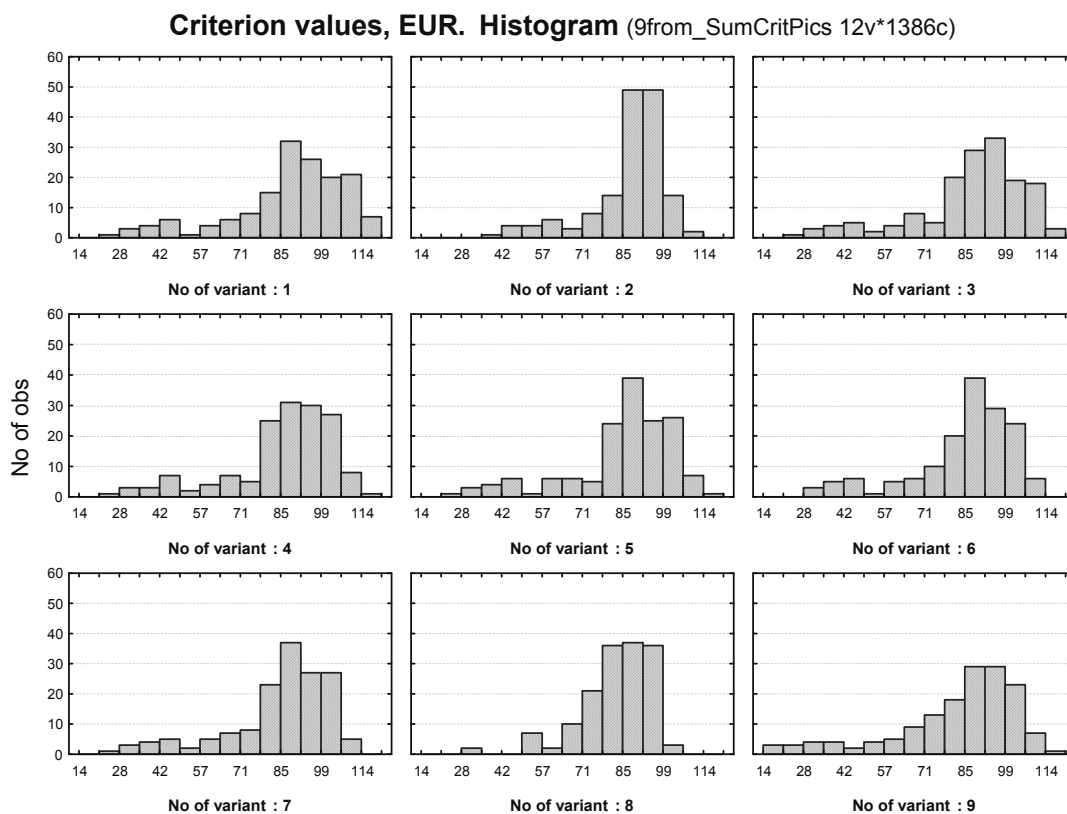


Рис. 17. Гистограммы критерия эффективности для отобранных комбинаций ресурсов

Воспользуемся непараметрическим U-критерием Манна-Уитни [3]. С его помощью проведём попарное сравнение выборок наблюдений 1-ого варианта (с максимальным средним значением критерия эффективности) с выборками наблюдений оставшихся 8 вариантов. Результаты сведём в табл. 13.

Таблица 13. Сравнение вариантов по критерию Манна-Уитни

*Mann-Whitney U Test (9from_SumCritPics)
Comparing two groups: Group 1 with the first rank and 2 rank Group 2
Marked tests are significant at $p < .05002$*

Criterion	Rank Sum Group 1	Rank Sum Group <i>i</i>	U	Z	p-level	Valid N group 1	Valid N group <i>i</i>	REM
Comparing the 1 variant with variant i=2	24925	22661	10726	1.449	0.147	154	154	
Comparing the 1 variant with variant i=3	24366	23220	11285	0.733	0.463	154	154	
Comparing the 1 variant with variant i=4	25025	22561	10626	1.577	0.115	154	154	
Comparing the 1 variant with variant i=5	25253	22333	10398	1.868	0.062	154	154	
Comparing the 1 variant with variant i=6	25533	22053	10118	2.227	0.026	154	154	<i>test is significant</i>
Comparing the 1 variant with variant i=7	25544	22042	10107	2.241	0.025	154	154	<i>test is significant</i>
Comparing the 1 variant with variant i=8	27171	20415	8480	4.323	0.000	154	154	<i>test is significant</i>
Comparing the 1 variant with variant i=9	25787	21799	9864	2.552	0.011	154	154	<i>test is significant</i>

Из данной таблицы следует, что отбросить можно 4 последних варианта, тогда как первые 5 вариантов являются статистически неразличимыми, и для выбора лучшего из них следует проанализировать дополнительные показатели, не вошедшие в критерий эффективности (2).

Сосредоточим внимание на первых пяти (статистически неразличимых) вариантах с наибольшими значениями критерия эффективности. Их основные параметры приведены в табл. 14.

Таблица 14. Основные параметры наиболее эффективных вариантов

Var No	Trucks	Tq_set	Ty_set	Combination Name	Mean of criterion, EUR
1	4	80	80	Tr=4, QC80, YC80	88
2	4	98	110	Tr=4, QC98, YC110	87
3	4	90	80	Tr=4, QC90, YC80	87
4	4	90	90	Tr=4, QC90, YC90	86
5	4	80	90	Tr=4, QC80, YC90	85

Как видим, в таблице остались только варианты с бригадой из 4-х тягачей, поэтому рассмотрим поверхность критерия эффективности для этого случая.

На рис. 18 поверхность средних значений критерия эффективности построена на множестве наблюдений, полученных посредством имитационного моделирования и сгруппированных в виде столбиков. Здесь по оси X отложены значения циклов Tq_set порталных кранов QC1, QC2 и QC3, равные соответственно 80, 90 и 98 секундам. По оси Y отложены значения циклов Ty_set ярдовых кранов YC1, YC2 и YC3, равные соответственно 80, 90 и 110 секундам. По оси Z отложены значения Criterion критерия эффективности (в EUR).

Как следует из рисунка, поверхность критерия имеет вогнутый характер с максимальными значениями в 2-х угловых точках (в самой близкой и в самой дальней). Это соответствует следующим парам кранов, являющихся претендентами на оптимальный выбор: QC1 и YC1, QC3 и YC3, QC2 и YC1, QC2 и YC2, QC1 и YC2.

Таким образом, один вид ресурса определен однозначно. Это бригада из 4-х тягачей с номинальной производительностью NP = 33 и стоимостью 166700 EUR.

3D Surface Plot (1statTr_4 10v*1386c)
Criterion (4 trucks) as function from QC(Tq_set) and YC(ty_set)
 = Distance Weighted Least Squares

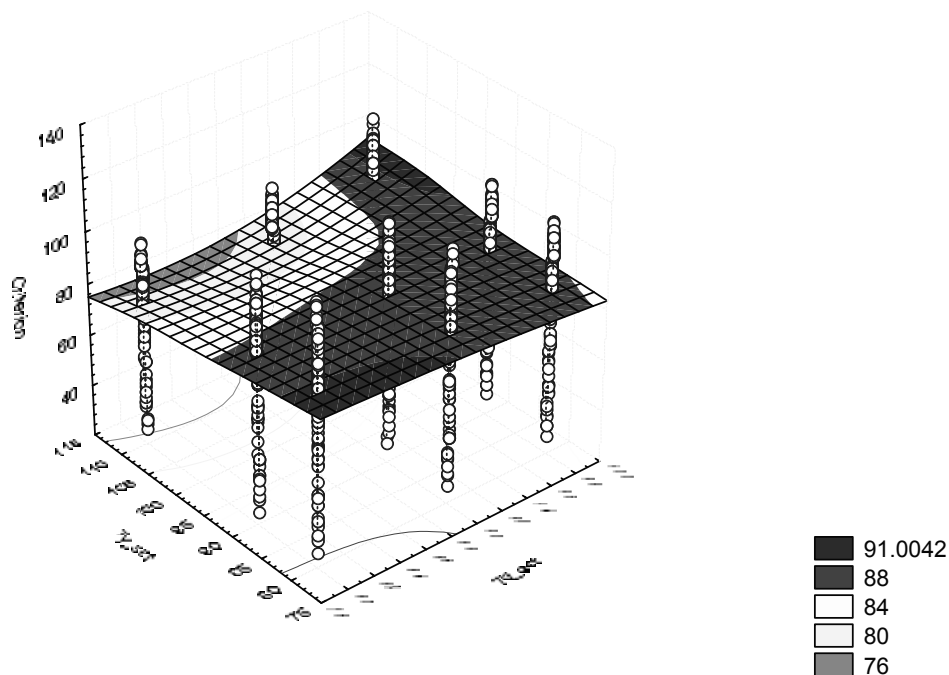


Рис. 18. Поверхность средних значений критерия эффективности для случая бригады из 4-х тягачей

Для окончательного выбора пары кранов среди оставшихся претендентов можно воспользоваться таблицей, на пересечении строк и столбцов которой даны значения цены соответствующей комбинации кранов, отнесенной к среднему значению критерия их эффективности, а также значения критерия. В скобках указаны проценты от максимального значения, равного 21415 EUR для комбинации QC1 + YC2. При этом рядом с обозначением крана в скобках указана его производительность.

Таблица 15. Нормированные цены пар кранов

Тип		YC1(45)	YC2(40)	YC3(33)
	Цена, EUR	875000	820000	770000
QC1(45)	1000000	21307 (99%), Crit = 88 EUR	21415 (100%), Crit = 85 EUR	
QC2(40)	920000	20632 (96%), Crit = 87 EUR	20233 (94%), Crit = 86 EUR	
QC3(37)	870000			18851(88%), Crit = 87 EUR

Если не принимать во внимание какие-либо иные соображения, то оптимальным вариантом является выбор оборудования по минимальным ценам. В табл. 16 представлены стоимости рассмотренных выше вариантов оборудования.

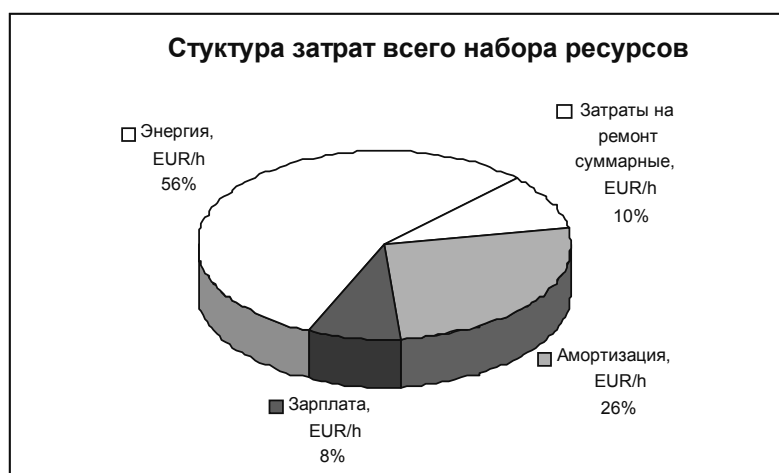
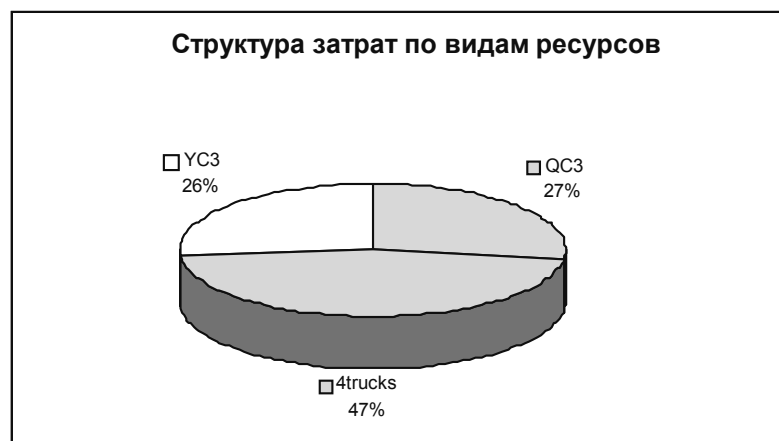
Таблица 16. Суммарные единовременные затраты на покупку кранов

Марка		YC1	YC2	YC3
	Цена	875000	820000	770000
QC1	1000000	1875000	1820000	1770000
QC2	920000	1795000	1740000	1690000
QC3	870000	1745000	1690000	1640000

Как следует из таблицы, в данном случае выбор наиболее дешевых (и в то же время наименее производительных) ресурсов QC3 и YC3 является оптимальным.

Таким образом, оптимальный набор ресурсов состоит из портального крана QC3, бригады из 4-х тягачей и ярдового крана YC3. Среднее значение критерия эффективности этого набора ресурсов было приведено в табл. 15. Оно равно 87 EUR и достигается при средней производительности: NP = 27 перемещений/час. Заметим, что номинальная производительность – QC3 = 37 перемещений/час, тогда как номинальная производительность – YC3 = 33 перемещений/час, поэтому имеется минимум 20% запас по производительности кранов.

На рис. 19 приведена структура затрат при использовании найденного оптимального набора ресурсов, а на рис. 20 – распределение затрат оптимального набора по отдельным ресурсам.

*Рис. 19.* Общая структура затрат оптимального набора ресурсов*Рис. 20.* Распределение затрат по отдельным ресурсам

Структуры затрат на рис. 19 и рис. 20 свидетельствуют о существенной неравномерности распределения затрат как по статьям расхода, так и по отдельным ресурсам.

6. СРАВНЕНИЕ С ТРАДИЦИОННЫМ ПОДХОДОМ

В заключение рассмотрим вопрос о целесообразности затраты весьма существенных усилий на имитационное моделирование, казалось бы, простых логистических цепей, состоящих, по существу, из трех основных элементов, обеспечивающих погрузку, перемещение и разгрузку груза.

Почему, например, при решении задачи выбора оптимального комплекта оборудования целесообразно привлекать имитационное моделирование? Почему традиционный подход не дает здесь необходимой точности?

Для ответа на эти и другие подобные вопросы решим задачу выбора оптимального набора ресурсов ВСТ без привлечения имитационного моделирования и сравним полученные результаты.

С точки зрения формально-традиционного подхода, вся логистическая цепочка элементов $QC_i + Tr_j + YC_k$ может функционировать с производительностью, равной наименьшей из производительностей (NP_{tr} , NP_{qc} , NP_{yc}) входящих в нее элементов, т.е.

$$NP(i,j,k) = NP_{min}(i,j,k) = \min(NP_{qci}, NP_{trj}, NP_{yck}). \quad (4)$$

Здесь индексы i, j, k отображают типы ресурсов, используемых в данной логистической цепи.

Тогда для расчета значения критерия эффективности (2) нужно полученное таким образом значение производительности $NP_{min}(i,j,k)$ подставить в соответствующую каждому ресурсу таблицу издержек, просуммировать все затраты, отвечающие данной производительности, и рассчитать значение критерия эффективности (2). Выбор наибольшего из рассчитанных таким образом значений критерия и определит наилучший состав ресурсов логистической цепи.

Всё это было бы справедливо в предположении, что вся технологическая цепочка будет работать с производительностью наиболее медленного элемента всей цепи. Однако очевидно, что любое повышение общей производительности приведет к повышенному износу, в первую очередь, наиболее медленного элемента цепи и к быстрому выходу его из строя, что вызовет неработоспособность всей цепи со всеми вытекающими отсюда издержками.

Итак, ключевым условием описанного подхода служит предположение о темпе работы технологической цепи с минимальной производительностью входящего в нее элемента.

В процессе работы производительность каждого механизма колеблется в пределах примерно $\pm 10\%$ от заданной (обычно номинальной) производительности. Рассмотрим влияние подобной статистической изменчивости в производительности каждого отдельного механизма на производительность всей технологической цепи. Для примера возьмем цепь из $QC_2 + Tr_5 + YC_2$, где $NP(QC_2) = 40$, $NP(Tr_5) = 41.9$, $NP(YC_2) = 40$. Так как здесь наименее производительны первый и последний элементы цепи, то и общая производительность всей цепи должна быть близкой к $NP(QC_2) = NP(YC_2) = 40$.

На рис. 21 рассмотрено влияние 10% статистического разброса производительности элементов логистической цепи, состоящей из QC_2 , Tr_5 и YC_2 , на максимально возможную (с точки зрения традиционного подхода) производительность всей цепи. С этой целью для 2000 наблюдений приведены полученные методом Монте-Карло гистограммы распределения производительностей QC_2 , Tr_5 , YC_2 , а также гистограмма наименее производительного элемента в каждой случайной комбинации производительностей элементов, составляющих цепь. Среднее значение указанной производительности равно 39.967 со среднеквадратичным отклонением 0.0481, что достаточно хорошо согласуется с ранее принятым значением, равным 40.

Казалось бы, отсюда вытекает, что традиционная схема должна работать и в условиях статистических колебаний производительностей элементов логистической цепи. Это положение можно проверить на описанной выше детальной статистической модели ВСТ.

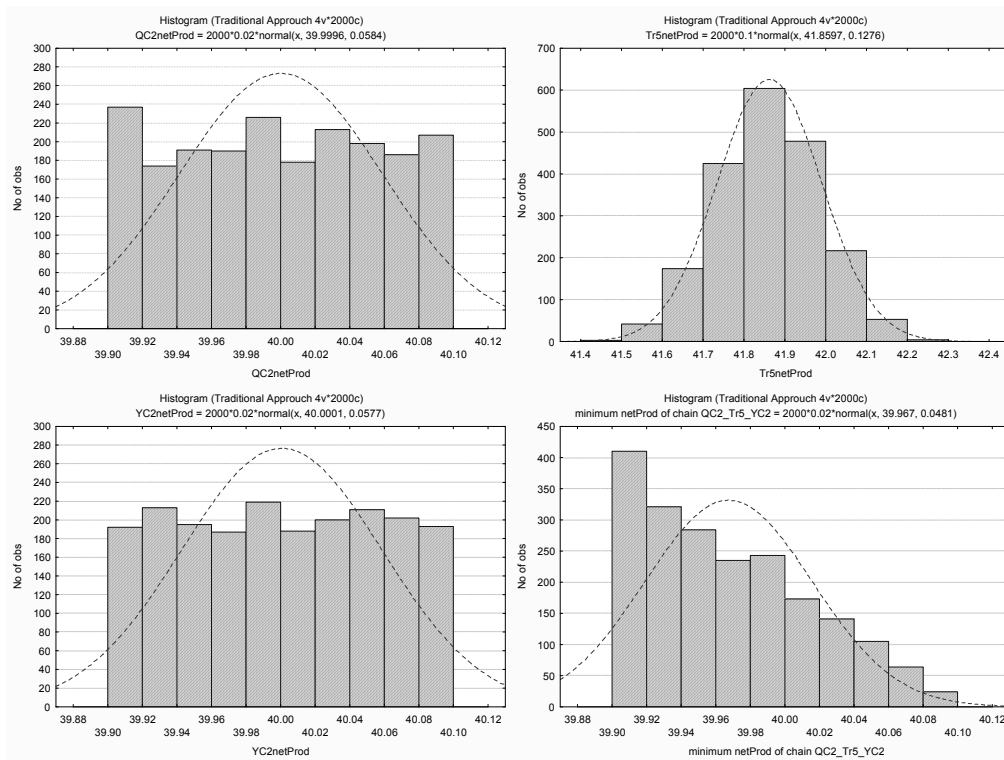


Рис. 21. Гистограммы производительностей для набора ресурсов QC2 + Tr5 + YC2, полученные с помощью традиционного подхода

На рис. 21 производительности кранов имеют практически равномерное распределение (графики слева). Производительность бригады тягачей имеет распределение, близкое к нормальному. Производительность же всего набора ресурсов имеет треугольное распределение, поэтому стандартное отклонение не может служить представительной характеристикой набора ресурсов.

В табл. 17 представлены значения производительностей (4) всех рассматриваемых в данной работе комбинаций ресурсов. Здесь же даны средние значения производительностей, наблюдавшихся для тех же комбинаций ресурсов по итогам имитационного моделирования. Результаты сравнения нанесем на график (см. рис. 22), по оси X которого отложим $\min(NP_{qci}, NP_{trj}, NP_{yck})$, т.е. значения выражения (4), а по оси Y – значения “Average of NP model” средних производительностей соответствующих комбинаций ресурсов, полученные с помощью имитационного моделирования.

Таблица 17. Значения производительностей рассматриваемых комбинаций ресурсов

Min (NP _{Ptr} , NP _{qC} , NP _{yc})	YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3	
NP of Resource NP	45	40	32.7	45	40	32.7	45	40	32.7	
Trucks = 3	25.1	Min (NP _{Ptr} , NP _{qC} , NP _{yc})			Average of NP model			(Min-Average)/Average, %		
QC1	45.0	25.1	25.1	25.1	23.0	22.8	22.3	9%	10%	13%
QC2	40.0	25.1	25.1	25.1	22.8	22.6	22.1	10%	11%	14%
QC3	36.7	25.1	25.1	25.1	22.6	22.5	23.3	11%	12%	8%

Min (NP _{Ptr} , NP _{qC} , NP _{yc})	YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3	
NP of Resource NP	45	40	32.7	45	40	32.7	45	40	32.7	
Trucks = 4	33.5	Min (NP _{Ptr} , NP _{qC} , NP _{yc})			Average of NP model			(Min-Average)/Average, %		
QC1	45.0	33.5	33.5	32.7	28.3	27.5	25.9	18%	22%	26%
QC2	40.0	33.5	33.5	32.7	27.8	27.3	25.7	20%	23%	27%
QC3	36.7	33.5	33.5	32.7	27.2	27.0	27.3	23%	24%	20%

Min (NP _{tr} , NP _{qc} , NP _{yc})		YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3
NP of Resource	NP	45	40	32.7	45	40	32.7	45	40	32.7
Trucks = 5	41.9	Min (NP _{tr} , NP _{qc} , NP _{yc})			Average of NP model			(Min-Average)/Average, %		
QC1	45.0	41.9	40.0	32.7	31.6	30.5	27.1	32%	31%	21%
QC2	40.0	40.0	40.0	32.7	30.7	30.1	27.1	30%	33%	21%
QC3	36.7	36.7	36.7	32.7	29.5	29.4	27.0	25%	25%	21%

Min (NP _{tr} , NP _{qc} , NP _{yc})		YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3	YC1	YC2	YC3
NP of Resource	NP	45	40	32.7	45	40	32.7	45	40	32.7
Trucks = 6	50.2	Min (NP _{tr} , NP _{qc} , NP _{yc})			Average of NP model			(Min-Average)/Average, %		
QC1	45.0	45.0	40.0	32.7	33.7	31.6	27.6	34%	27%	19%
QC2	40.0	40.0	40.0	32.7	31.5	31.1	27.5	27%	29%	19%
QC3	36.7	36.7	36.7	32.7	29.7	29.6	27.4	24%	24%	19%

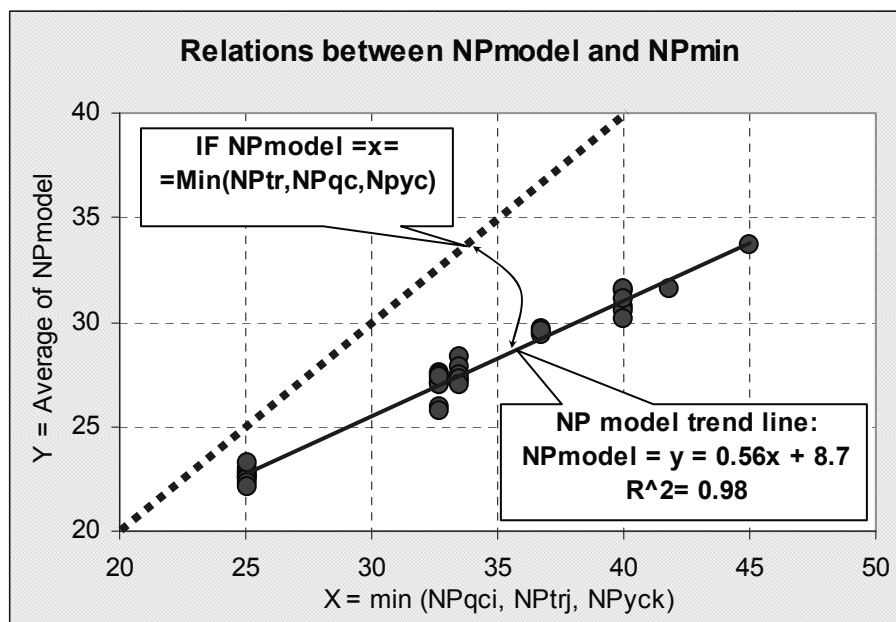


Рис. 22. Зависимость между производительностями ресурсов, полученными с помощью имитационного моделирования и на основании традиционного подхода

Из полученного графика следует, что предположение о темпе работы технологической цепи с минимальной производительностью входящего в нее элемента не выполняется, причем ошибка линейно возрастает с ростом производительности и в рассматриваемом диапазоне производительностей от NP = 20 до NP = 40 составляет от 10% до 25%, что неприемлемо для определения наилучшей комбинации ресурсов, которые сами отличаются по производительности на 15%–25%.

Так как экономические показатели логистической цепи зависят от ее производительности, очевидно, что расхождения в значениях критерия эффективности (2), рассчитанных с помощью имитационного моделирования и на основании традиционного подхода, также будут весьма существенны.

На рис. 23 приведены результаты расчетов значений критериев эффективности, полученных как с помощью имитационного моделирования, так и для минимальных производительностей наборов ресурсов.

Как следует из рис. 22 и рис. 23, расхождения в оценках критерия эффективности рассмотренными методами (имитационным и традиционным) в среднем исчисляется десятками процентов, поэтому при решении практических задач предпочтение, как правило, отдается более точному методу, методу имитационного моделирования.

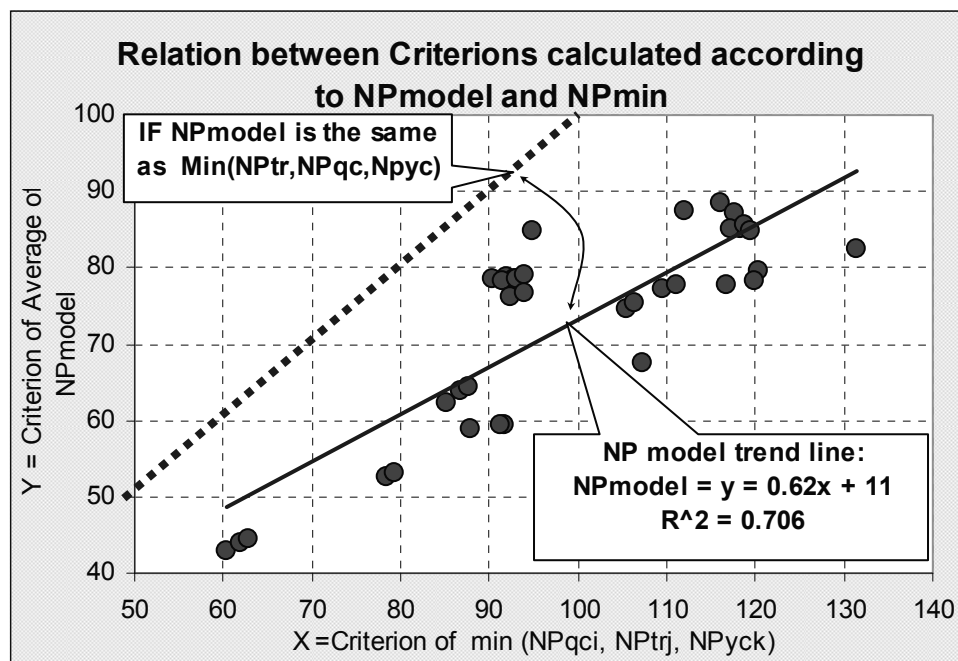


Рис. 23. Зависимость между значениями критерия эффективности, полученными с помощью имитационного моделирования и на основании традиционного подхода

7. ВЫВОДЫ

Решена задача выбора оптимального набора технологических ресурсов при обработке 40-футовых контейнеров на Балтийском контейнерном терминале (ВСТ). При этом продемонстрирована эффективность применения имитационного моделирования для решения подобных задач. С этой целью полученные с помощью имитационного моделирования результаты были сравнены с результатами использования традиционного подхода, исходящего из предположения о работе логистической цепи с производительностью, равной производительности наименее производительного элемента цепи. Результаты этого сравнения наглядно продемонстрировали преимущество имитационного моделирования, учитывающего взаимодействие между элементами логистической цепи и в итоге обеспечивающего существенно более высокую точность расчетов.

Приведенное решение задачи оптимального выбора технологических ресурсов ВСТ демонстрирует методику решения задач оптимизации ресурсов, которая может быть использована при решении задач оптимального выбора ресурсов в различных логистических системах, например, в складских системах и на транспортных узлах (в аэропортах, на железнодорожных станциях и т.д.).

Литература

- [1] W. David Kelton, Randall P. Sadowski and Deborah A. Sadowski. *Simulation with Arena*. 2nd edition. McGraw-Hill, 2002. 631 p.
- [2] Yuri Merkuriev, Vladimir Bardachenko, Andrey Solomennikov and Fred Kamperman. The Baltic Container Terminal Simulation System. *Applications of Simulation and IT Solutions in the Baltic Port Areas of the Associated Candidate Countries*. Ed. by E. Bluemel, J. Babot and L. Novitsky. Riga: JUMI Ltd, 2003, pp. 47-83.
- [3] Закс Л. *Статистическое оценивание*. Москва: Статистика, 1976. 598 с.
- [4] Yuri Merkuriev, Vladimir Bardachenko, Andrey Solomennikov and Fred Kamperman. Multi-level simulation of logistics processes at the Baltic Container Terminal. *Proceedings of the International*

- Workshops on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling & Simulation, HMS2002, and Modelling and Applied Simulation, MAS2002. October 3-5, 2002, Bergeggi, Italy.* Ed. by Agostino G. Bruzzone, Yuri Merkurjev, Roberto Mosca. Genoa University, 2002, pp. 78-83.
- [5] Yuri Merkurjev, Vladimir Bardachenko, Fred Kamperman and Andrey Solomennikov. Multi-level simulation of logistics processes at the Baltic Container Terminal: Calibration study. *Modelling and Simulation of Business Systems. Proceedings of the International Conference. May 13-14, 2003, Vilnius, Lithuania.* Ed. by H. Pranevicius, E. Zavadskas and B. Rapp. Kaunas: Technologija, 2003, pp. 274-278.
- [6] Yuri Merkurjev, Vladimir Bardachenko, Andrey Solomennikov and Fred Kamperman. Simulation of logistics processes at the Baltic Container Terminal: Model validation and application. *Proceedings of the International Workshop on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation. HMS2003. September 18-20, 2003, Riga, Latvia.* Ed. by Yuri Merkurjev, Agostino G. Bruzzone, Galina Merkurjeva, Leonid Novitsky and Edward Williams. Riga: RTU, 2003, pp. 294-302.
- [7] H.Jula, C.I. Liu, and P.A. Ioannou. *Design, Analysis, Simulation, and Evaluation of Advanced Container Terminals.* USA, Center for Advanced Transportation Technologies (CATT). University of Southern California, 2002. 20 p. – <http://www.usc.edu/dept/catt>
- [8] Averill M. Law, and W. David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis.* 3rd edition. McGraw-Hill, 2000. 760 p.