

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ЗАВОДА

Д.Н. Маряшина, Т.В. Девятков, В.В. Девятков, И.З. Харисов (Казань)

Введение

Рядом с городом Сегежа (Республика Карелия), в дополнение к существующему целлюлозно-бумажному комбинату, начато проектирование нового целлюлозного завода (далее ЦЗ) [1]. ЦЗ должен обеспечить выпуск 1,5 млн. тонн беленой лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы. Важнейшей частью обеспечения плановых производственных показателей является создание системы ритмичной поставки лесоматериалов и другого сырья, а также планомерной отгрузки готовой продукции. А это синхронизация прибытия, разгрузки/погрузки и убытия сотен автомобилей, десятков железнодорожных составов и нескольких судов в день. При этом производство должно функционировать ритмично, без сбоев и остановов.

В самом общем виде контур логистики исследуемой системы ЦЗ без детализации технологий погрузки/разгрузки и движения транспортных средств приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема системы логистики ЦЗ

Учитывая сложность и масштабность системы (разветвленная сеть железнодорожных и автомобильных дорог, сотни транспортных средств и погрузочно-разгрузочного оборудования, сезонность и т.д.), провести исследование системы аналитическими методами невозможно. Поэтому сначала была проведена формализация логистики ЦЗ в виде системы массового обслуживания, а в качестве основного метода исследования выбрано имитационное моделирование (ИМ).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью имитационного исследования было обоснование наилучшего варианта генерального плана проекта в части логистики с расчетом соответствующих количественных значений параметров: пространственных, инфраструктурных и технических решений. При этом должна быть обеспечена возможность ритмичной работы ЦЗ при полном выполнении годовой производственной программы по объемам выпуска всех видов готовой продукции.

В ходе исследования необходимо было решить следующие задачи:

- оценка границ пропускной способности и структуры сети автомобильных дорог внутри предприятия;
- исследование пропускной способности ж/д инфраструктуры предприятия, выявление и анализ «узких» мест, определение факторов, влияющих на показатели пропускной способности отдельных участков;
- анализ работы грузовых фронтов по разгрузке баланса и щепы ж/д, автомобильным и водным транспортом, выявление «узких» мест, выбора технологии разгрузки, параметров производительности и количества используемого оборудования;
- исследование грузового фронта по отгрузке готовой продукции, выбор технологии отгрузки готовой продукции, ее параметров и количества оборудования;
- экономическое сравнение вариантов технологий погрузки/разгрузки по показателям CAPEX/OPEX;
- выбор наилучших из предлагаемых в генеральном плане проектных решений или формулирование дополнительных ограничений и рекомендаций по совершенствованию сети автомобильных дорог, ж/д инфраструктуры, алгоритмов и технологий проведения разгрузочно-погрузочных работ.

Математически в самом общем виде цель исследования можно сформулировать в виде ряда оптимизационных задач, где необходимо минимизировать (максимизировать) ряд показателей системы производственной логистики, а в качестве ограничений выступают обязательность исполнения производственных планов, параметры автодорожной сети, железнодорожной инфраструктуры, характеристики оборудования (на грузовых фронтах), сезонность поставок, показатели CAPEX/OPEX [2-3].

Выбор той или иной задачи, зависит от выбранного направления исследования. Пример формализации одной из таких задач – минимизации простоя всех типов транспортных средств с сырьем на территории ЦЗ – приведен в формуле (1).

$$\begin{cases} T_{\text{пр}}^{\text{авт}} = \sum_1^{n_1} (T_{\text{дв}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{разг}})^{\text{лес}} + \sum_1^{n_2} (T_{\text{дв}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{разг}})^{\text{щеп}} + \\ \quad + \sum_1^{n_3} (T_{\text{дв}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{разг}})^{\text{хим}} \rightarrow \min \\ T_{\text{пр}}^{\text{жд}} = \sum_1^{m_1} (T_{\text{дв}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{разг}}) * N_{\text{ваг}}^{\text{бал}} + \sum_1^{m_1} (T_{\text{дв}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{разг}}) * N_{\text{ваг}}^{\text{щеп}} + \\ \quad + \sum_1^{m_1} (T_{\text{дв}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{разг}}) * N_{\text{ваг}}^{\text{хим}} \rightarrow \min \\ T_{\text{пр}}^{\text{реч}} = \sum_1^k (T_{\text{оч}}^{\text{прич}} + T_{\text{разг}}^{\text{бар}} + T_{\text{оч}}^{\text{отч}}) \rightarrow \min \end{cases} \quad (1)$$

где $T_{\text{пр}}^{\text{авт}}$, $T_{\text{пр}}^{\text{жд}}$, $T_{\text{пр}}^{\text{реч}}$ – суммарное время простоя соответственно автомобилей, ж/д вагонов, судов; $T_{\text{дв}}$, $T_{\text{оч}}$, $T_{\text{разг}}$ – время нахождения для каждого автомобиля и ж/д вагона, соответственно в движении, в очереди и на разгрузке; $T_{\text{оч}}^{\text{прич}}$, $T_{\text{разг}}^{\text{бар}}$, $T_{\text{оч}}^{\text{отч}}$ – время ожидания и причаливания судна, разгрузки, отчаливания судна соответственно.

Аналогичным образом были поставлены задачи оптимизации ряда параметров ж/д инфраструктуры, сети автомобильных дорог, применяемых технологий выполнения погрузки/разгрузки и т.д.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И ИМИТАЦИОННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Для разработки модели была выбрана дискретно-событийная среда моделирования GPSS Studio [4]. В использовании инструментов, реализующих агентный подход к моделированию, не было необходимости.

Модель была описана в виде иерархической структурной схемы. Она состоит из трех уровней вложения, которые содержат более десятка дочерних схем, объединяющих вместе несколько сотен более мелких типовых элементов (ТЭБов). Фрагмент сегмента корневой схемы в этой иерархии приведен на рис. 2.

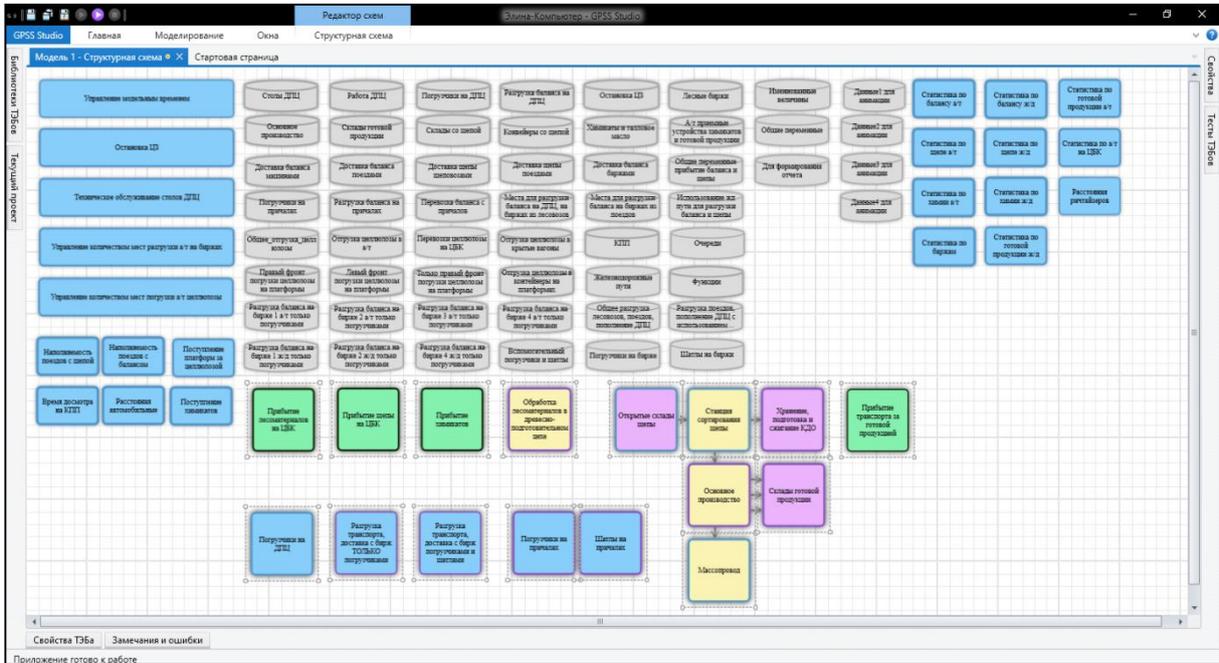


Рис. 2. Фрагмент структурной схемы имитационной модели ЦЗ

Исходные данные модели строго структурированы в рамках более чем 60 ТЭБов и матриц с данными. Пример одной из таких матриц приведен на рис. 3.

Индекс строки	Индекс столбца	Остальные индексы
1	2	3
1	5667.86	67.153
2	77.6861	520
3	478.646	371.682
4	376.965	644.851
5	77.6861	520
6	1855.12	1947.56
7	316.667	5984.54
8	4236.88	158.237
9	520	520
10	546.54	6214.38
11	1965.59	258.31
12	918.159	5538.91
13	732.484	5353.20
14	972.541	5593.35
15	2182.35	1097.27
16	3178.69	587.965
17	2416.17	4144.98
18	215.33	4555.32
19	2275.55	4195.85
20	2594.74	3643.89
21	212.586	398.14
22	544.756	6212.64
23	54.6891	628.574
24	243.78	437.466
25	2977.37	4791.34
26	2941.37	4755.27
27	291.11	4724.81
28	2879.63	4693.65
29		
30		
31		

Рис. 3. Матрица расстояний по автомобильным дорогам внутри предприятия

Из заполненных ТЭБов с данными, отлаженных GPSS-моделей отдельных ТЭБов и установленных в структурной схеме связей между композитными и типовыми ТЭБаи автоматически генерируется общая имитационная модель ЦЗ. По результатам данной разработки модель получилась очень большая, более 100000 строк, из которых несколько десятков тысяч – блоки GPSS World.

После создания модели была проведена ее отладка. На основе модели было построено имитационное приложение системы производственной логистики, ориентированное на руководителей и специалистов по логистике ЦЗ. Было сконструировано более десятка диалогов по вводу исходных данных, которые являлись изменяемыми факторами в экспериментах. Пример одного из таких диалогов приведен на рис. 4.

Количество лесовозов в день в период 1	143	Количество лесовозов в день в период 1 на ДПП	143
Количество лесовозов в день в период 4	231	Количество лесовозов в день в период 4 на ДПП	193
Количество лесовозов в день в период 6	231	Количество лесовозов в день в период 6 на ДПП	231
Количество лесовозов в день в период 7	143	Количество лесовозов в день в период 7 на ДПП	143

Рис. 4. Подготовка данных эксперимента о поставках баланса

Для более быстрого планирования и подготовки данных эксперимента, а также учета всех существующих технологических, экономических, сезонных и других ограничений и взаимосвязей между данными, нами был разработан специальный Excel калькулятор, рассчитывающий весь набор зависимых данных эксперимента при вводе ключевых параметров. После завершения работ Excel калькулятор также был передан Заказчику.

Далее для приложения были разработаны формы представления и диалоги анализа интересующих нас базовых показателей работы модели: динамики изменения параметров очередей в течение эксперимента, загрузки оборудования и т.д.

Кроме стандартных форм с базовыми показателями в данном приложении был создан ряд форм, содержащих интегральные показатели и отражающих предметную специфику работы системы логистики. Например, это итоговые MS Excel таблицы жизненного цикла нахождения транспортных средств на территории ЦЗ, MS Excel таблицы экономического сравнения использования различных технологий разгрузки/погрузки, 3D анимация логистических процессов в рамках ВМ модели предприятия.

Пример вывода таблицы жизненного цикла и фрагмент анимации приведены на рис. 5 и 6.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a grid of data. The columns are labeled with letters from B to AG, and the rows are numbered 1 to 25. The data is organized into several sections, with some cells highlighted in red. The spreadsheet appears to be a detailed report on the life cycle of rail locomotives, with columns representing different activities and rows representing different locomotive models. The data is organized into a grid with many cells containing numerical values, likely representing time or cost. The interface includes standard Excel menus and toolbars.

Рис. 5. Отчет о жизненном цикле ж/д составов (баланс, щепа, химия) за один день

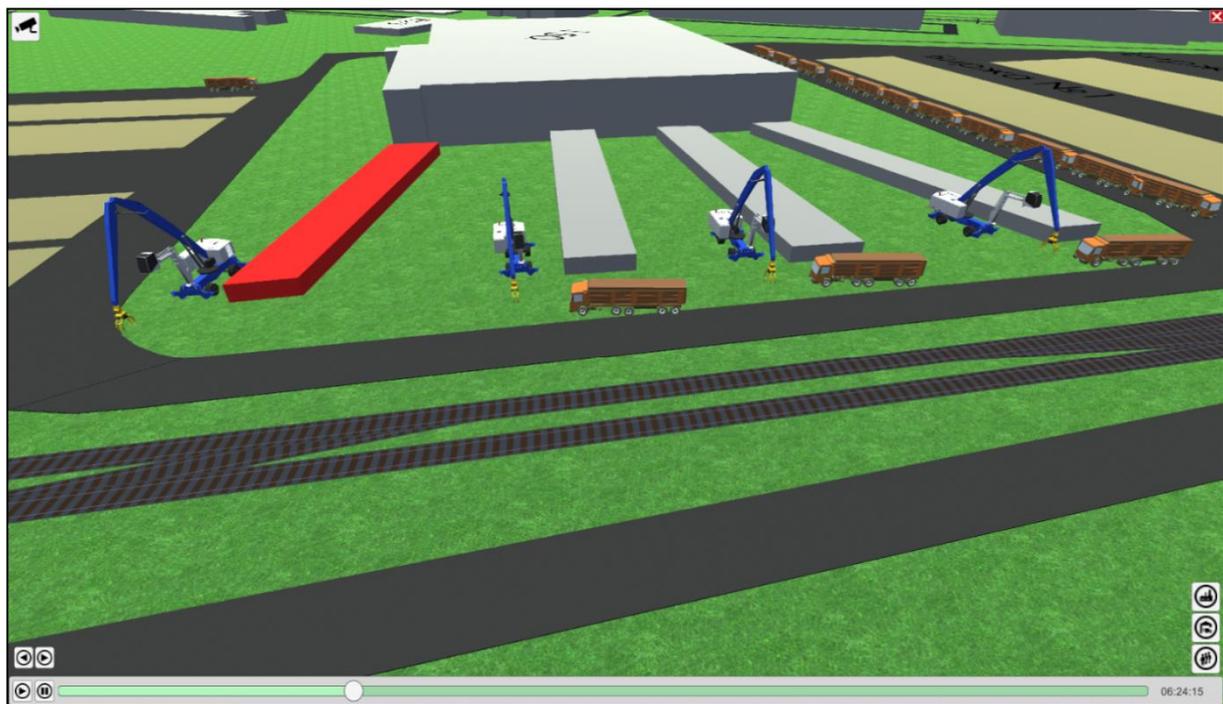


Рис. 6. Анимация разгрузки лесовозов на ДПЦ

Далее были сформулированы сценарии исследования и проведено само имитационное исследование.

ОСНОВНЫЕ СЦЕНАРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационное исследование проводилось в соответствии с целью и задачами, которые были описаны ранее. В рамках статьи описать все сценарии не представляется возможным, поэтому выделим некоторые, наиболее интересные, из множества реализованных сценариев исследования.

1. Провести экспериментальную проверку двух вариантов технологии разгрузки щепы с помощью погрузчика MANTSINEN или с использованием разгрузателя Хабибуллина.

Необходимо было дать ответы на ряд вопросов.

Не возникает ли в производственной цепочке рассогласований по производительности? Случится ли где-то ситуация, что запланированное к установке оборудование не справляется с разгрузкой запланированного объема? И наоборот, нет ли мест, где производительность оборудования избыточна? Какая из двух технологий экономически более привлекательна?

2. Провести выбор технологии отгрузки готовой продукции из двух возможных с помощью использования двух пар коротких составов на тупиках слева и справа от склада и с использованием одного длинного состава на тупике справа от склада.

Результаты исследования должны дать ответы на следующие вопросы:

«Справятся» ли со среднесуточной отгрузкой оба варианта технологии? Какой максимальный объем позволяет отгрузить тот или иной вариант? Имеется ли резерв в технологиях по увеличению объемов отгрузки? Как соотносятся варианты экономически по показателям CAPEX/OPEX?

3. Осуществить анализ инфраструктуры водной транспортной составляющей доставки баланса: причала, грузовых фронтов, используемых погрузчиков у причала и шаттлов-тяжеловозов для перевозки баланса на лесобиржу (склад открытого хранения лесоматериалов).

По результатам анализа необходимо было дать ответы на следующие вопросы:

Какой максимальный объем судов может быть обработан на предлагаемой инфраструктуре причала и используемом типе судна? Какой при этом необходим объем временной лесобиржи у причала? Сколько шаттлов-тяжеловозов необходимо для ритмичной работы причала и минимизации загрузки временной лесобиржи?

4. Проанализировать две технологии работы с балансом на лесобирже: с использованием только мобильных погрузчиков (для разгрузки/погрузки и транспортировки) и совместное использование мобильных погрузчиков (для разгрузки/погрузки) и шаттлов-лесовозов (для транспортировки).

По результатам анализа необходимо было дать ответы на следующие вопросы:

Какая технология предпочтительней по производственным показателям (выполнение плана, отсутствие очередей, допустимый уровень загрузки оборудования и т.д.)? Какое оптимальное количество оборудования, и в какие периоды поставок требуется для ритмичной работы? Как соотносятся технологии по экономическим показателям CAPEX/OPEX?

5. Исследовать две стратегии наполнения лесобиржи: «С колес» и «Со страховым запасом» – и дать Заказчику дополнительную информацию для обсуждения вопроса об экономически выгодном размере страхового запаса.

По результатам исследования необходимо было дать ответы на следующие вопросы:

Какая из двух стратегий наиболее экономически выгодна? Справляется ли стратегия с «колес» со своевременным и ритмичным обеспечением производства? Какой объем страхового запаса необходим, чтобы происходило его обновление в течение 3 месяцев?

Для ответа на эти вопросы в рамках описанных выше сценариев были определены границы изменения факторов, разработаны планы конкретных экспериментов и проведены серии направленных экспериментов с имитационным приложением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным результатом исследования для Заказчика стала разработанная проектная документация раздела «Технология производства» и отчет по исследованию объемом свыше 200 страниц, в котором была определена потребность в механизмах, в штатной численности сотрудников, были рассчитаны графики движения железнодорожной, автомобильной и водной техники. Из-за ограничений размера статьи приведем лишь фрагменты наиболее важных результатов исследований.

Самой распространенной стратегией наполнения лесобиржи является стратегия «Со страховыми запасами».

Нами была проверена и стратегия «С колес» – идеальный вариант, когда вся логистическая система работает строго по разработанным расписаниям, они исполняются, а транспортное обеспечение не дает сбоев. В этом случае нами был найден вариант, когда все работает и всего достаточно, завод ритмично и по плану выпускает продукцию. Но понятно, что любой сбой системы может привести к печальным результатам, самым главным из которых может быть остановка завода – а это огромные финансовые потери. Поэтому позиция завода была нацелена на создание максимально большого запаса лесобиржи в 250 тыс. м³, при этом он был базовым при всех экспериментах (рис. 7).

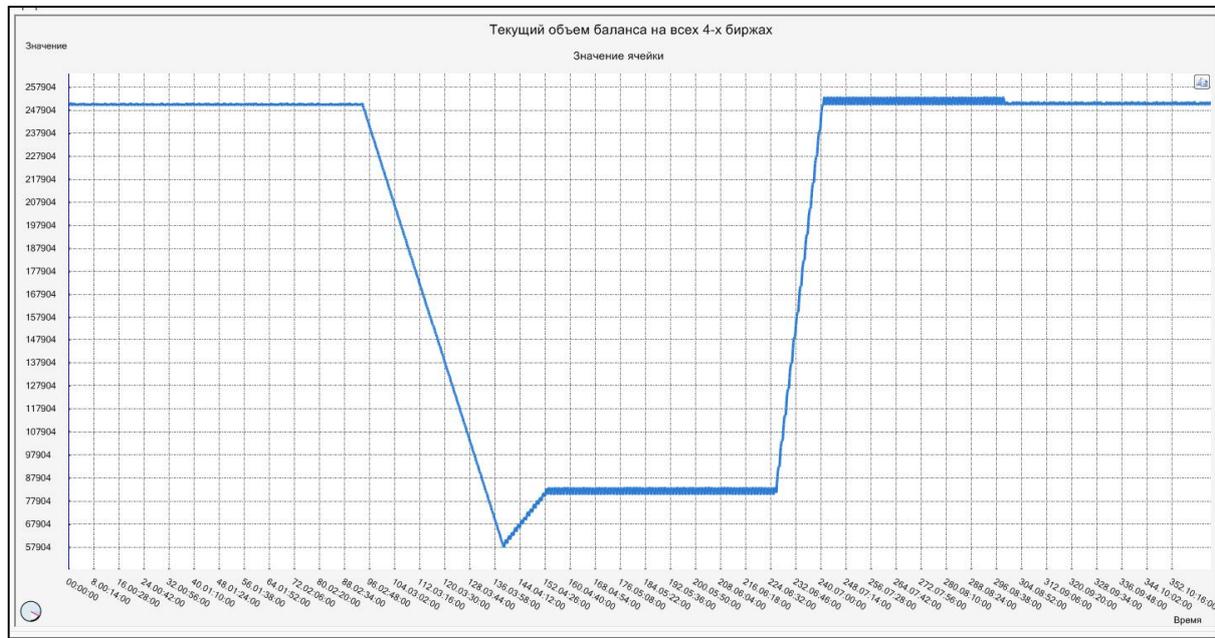


Рис. 7. Динамика изменения текущего наличия баланса на лесобирже в базовом варианте поддержания страховых запасов

В результате мы предложили Заказчику промежуточный вариант с уменьшением объема лесобиржи до 150-200 тыс. м³, что позволит сэкономить достаточно большие средства за счет уменьшения необоротного запаса и направить его на совершенствование производства.

Также остановимся на результатах, полученных при реализации четвертого сценария.

На рис. 8 показано использование погрузчиков и шаттлов в различные периоды работы. Работа логистической системы разделена на семь периодов по сезонным признакам (навигация, открытые автомобильные дороги и т.д.) и планируемой интенсивности поставок сырья и материалов.

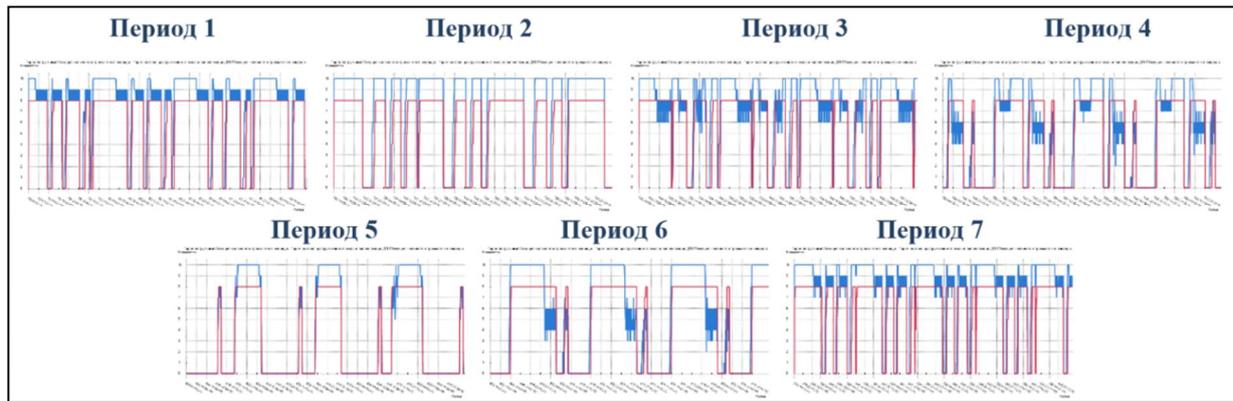


Рис. 8. Использование погрузчиков и шаттлов в разные периоды интенсивности поставок

С помощью экспериментов удалось точно рассчитать загрузку шаттлов и требуемое их количество по всем периодам (табл. 1).

Таблица 1. Загрузка и прогноз требуемого количества погрузчиков и шаттлов по периодам

Период	Особенности ситуации	Загрузка шаттлов/погрузчиков	Прогноз необходимого числа погрузчиков/шаттлов
1	Разгрузка только лесовозов, не попавших на ДПЦ, и возврат этого баланса погрузчиками	13-15% / 10-12%	1-2/2
2	Этап активного расхода лесобиржи, шаттлы в основном везут баланс на ДП	20-25% / 18-22%	2-3/2
3	Начинают прибывать лесовозы, идет расход лесобиржи	30-35% / 25-30%	3-4/2-3
4	Наступает период активного пополнения лесобиржи	60-65% / 45-50%	6-7/4
5	Погрузчики и шаттлы разгружают ж/д составы и шаттлы-тяжеловозы	65-70% / 45-50%	7-8/4
6	Добавляются лесовозы в большом количестве	40-45%/	4-5/4
7	Активность на лесобирже падает	20-25%	1-2/2

Заключение

Проведенная работа показала высокий потенциал использования ИМ на этапе концептуального – эскизного проектирования логистических систем крупных промышленных предприятий. Моделирование позволяет выявить «узкие» места и ошибки в проектных решениях при относительно низких затратах. Также очевидно, что данная модель может «жить и развиваться» вместе с проектом вплоть до его реализации, и даже в процессе эксплуатации предприятия. Возможности среды моделирования достаточны для создания таких моделей, а их значительный размер и большой объем данных не являются препятствием высокой скорости ее работы.

Литература

1. Segezha Group и Карелия подтверждают намерение построить современный целлюлозно-бумажный промышленный кластер // Официальный интернет-портал Республики Карелия [Электронный ресурс] URL: <https://gov.karelia.ru/news/03-06-2021-segezha-group-i-kareliya-podtverzhdaiut-namerenie-postroit-sovremennyy-tsellyulozno-bumazhnyy-promysh/>.
2. **E. M. Goldratt, J. Cox.** The Goal: A Process of Ongoing Improvement (Rev. ed.), Avraham Y. Goldratt Institute, 1992.
3. **Jan R. Williams, Susan F. Haka, Mark S. Bettner, Joseph V. Carcello** Financial and Managerial Accounting. McGraw-Hill / Irwin, 2008.
4. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. Пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов; под общей ред. В.В. Девяткова. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 283 с.