

УДК 519.876.5

АНАЛИЗ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМ

В.М. Гостев, Т.В. Девятков, М.В. Федотов, Ш.Д. Хайбуллин (Казань),
М.М. Абашев (Глазов)

Введение

Ставилась задача исследовать сложную производственную систему – крупный цех предприятия ($S_{ц}$), имеющий более 200 единиц оборудования, реализующий десятки технологических процессов и обеспечивающий исполнение множества логистических операций по перемещению заготовок (партий заготовок заказа) для выполнения очередной операции к нужному оборудованию или к местам временного хранения (МВХ). В зависимости от количества и размеров перемещаемых заготовок, а также от маршрута перемещения, используется различное транспортное оборудование – автомобили, крановое оборудование, тележки и др. В итоге все эти логистические операции, маршруты, транспортное оборудование и персонал, обслуживающий транспортировку, был объединен в логистическую подсистему цеха ($S_{лц}$). При этом $S_{лц} \in S_{ц}$.

Ежедневное функционирование системы $S_{ц}$ представляет собой реализацию множества заказов $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$, каждый в соответствии с требуемыми технологическими процессами, на требуемом оборудовании, при наличии ресурсов (материалов, персонала) и строго по запланированному сменно-суточному производственному заданию ($П_{пл}$), сформированному системой планирования (MES). При этом в системе $S_{ц}$ происходит еще множество других процессов – проведение планово-предупредительного (ППР) или аварийного ремонта оборудования, передвижение оборудования и персонала, перерывы в работе персонала, пересменки.

У заказчика были обоснованные предложения о возможности снижения времени протекания процесса (ВПП) по изготовлению продукции в рамках заказа и уменьшения объемов незавершенного производства (НЗП) за счет оптимизации (снижения временных затрат и лучшей организации) внутрицеховой логистики.

Особенностью алгоритмов планирования MES на данном предприятии является то, что в большинстве случаев в качестве отдельных операций в заказе z_j ($j=1, \dots, m$) рассматриваются только операции $i=(1, \dots, n)$ на технологическом оборудовании, а внутри времени до начала следующей операции предполагается проведение логистических операций и других действий, не связанными с технологическим процессом, например, ППР. Т.е. план MES рассчитывает только времена начала последовательных основных технологических операций. Например, для i -й операции – $t_{пл.н.}^i$, при этом плановое время завершения i -й операции считается $t_{пл.з.}^i = t_{пл.н.}^{i+1}$. Более наглядно этот факт можно проиллюстрировать на рис. 1.

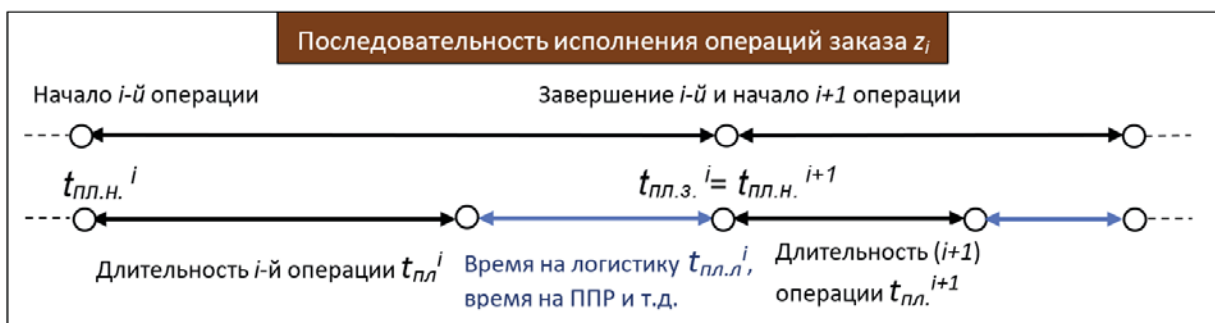


Рис. 1. Планирование двух последовательных операций в MES

Анализируя такой принцип планирования операций, можно предположить (и это подтвердилось на практике), что резерв времени, закладываемый на логистику и другие действия, дополняющие основные технологические операции, определяется MES достаточно приблизительно, без изучения вариантов построения, организации и обслуживания подсистемы логистики $S_{лц}$.

Постановка задачи исследования

Перед авторами стояла задача детального изучения системы $S_{ц}$ и разработки инструмента оптимизации ее подсистемы $S_{лц}$, посредством построения имитационной модели цеха с общим описанием технологии и детальным учетом логистики, проведения с ней экспериментов и анализом использования результатов по следующим двум направлениям:

– **стратегического исследования** – поиска «узких мест» в логистике, анализа вариантов их устранения, оценка последствий использования более производительного оборудования, измененных технологических процессов или корректировки принципов управления логистической подсистемой цеха;

– **оперативного управления** – своевременной выработки практических рекомендаций для совершенствования подсистемы логистики, автоматической передаче их в подсистему оперативного планирования MES и, в итоге, совершенствования разрабатываемых сменно-суточных и других производственных заданий.

Эксперименты с моделью в каждом из приведенных выше сценариев должны были ответить на многие вопросы и помочь в формулировании рекомендаций по снижению ВПП (T_{Zcp}) и суммарных объемов НЗП ($V_{нзп}$), для повышения эффективности производства.

Формально эту задачу аналитически – в самом обобщенном виде – можно сформулировать следующим образом:

$$T_{Zcp} = \sum_1^m \frac{T_{Zcp}^j}{m} + T_{прол} = \sum_1^m \frac{\sum_1^n (t_{ф}^{ij} + t_{ф.л}^{ij})/n^j}{m} + T_{ф.прол}^{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$V_{нзп} = \sum_1^m V_{нзп}^j = \sum_1^n V_{ф.нзп}^{ij} \rightarrow \min,$$

где $t_{ф}^{ij}$ – фактическое время исполнения i -й операции (основной технологической) j -го заказа;

$t_{ф.л}^{ij}$ – фактическое время исполнения логистической операции после i -й операции (основной технологической) j -го заказа. Если такой операции не предусмотрено, то время равно 0;

$T_{ф.прол}^{ij}$ – фактическое время «пролеживания» деталей после технологической и логистической операций до начала $i+1$ операции;

$V_{ф.нзп}^{ij}$ – фактическое значение объема незавершенного производства на i -й операции (основной технологической) после завершения каждого заказа;

$i=1, n$ и $j=1, m$ – диапазоны изменения количества основных операций в заказе и количества самих заказов.

Данная оптимизационная задача будет корректна лишь при условии выполнения всех сроков и объемов сменно-суточного задания $П_{пл}$ – на имеющемся в цехе оборудовании по требуемым технологиям, при своевременном проведении планово-предупредительных ремонтов оборудования и выполнении многих других условий.

Так как значения ВПП и НЗП зависят от множества других, в том числе и неучтенных в аналитической постановке задачи факторов, то в целом задача исследования более сложна, чем показано в (1):

$$T_{Zcp} = f^1\{\phi^1_1, \phi^1_2, \dots\} \text{ и } V_{нзн} = f^2\{\phi^2_1, \phi^2_2, \dots\} \quad (2)$$

где $\{\phi^1_1, \phi^1_2, \dots\}$ – факторы, влияющие в системе на время исполнения заказа;
 $\{\phi^2_1, \phi^2_2, \dots\}$ – факторы, влияющие в системе на объемы незавершенного производства.

В динамике производственного процесса некоторые из этих факторов имеют стохастический характер, а некоторые вообще не определены. По крайней мере, в виде аналитической формулы их не описать, и в целом, теоретически решить эту систему уравнений невозможно.

Поэтому решалась она методом имитационного моделирования. Работа системы представлялась моделью с максимальным учетом имеющихся факторов и нахождения наилучших решений посредством проведения множества экспериментов в рамках профессиональной платформы моделирования ALINA GPSS [1]. Выбор платформы обусловлен тем, что она является синтезом знаний и многолетнего опыта, проверена авторами на множестве практических задач и признана экспертами в области имитационного моделирования. Хотя существует целый ряд других программных инструментов для создания имитационных моделей производственно-логистических систем [2-5].

Генератор имитационной модели

Учитывая, что имитационной моделью должны пользоваться специалисты предприятия, работающие на производстве и не владеющие навыками программирования и моделирования, при ее разработке упор делался на создание приложения с концепцией No Code и дружественным, ориентированным на предметную область интерфейсом при вводе данных и анализе результатов. Это необходимо для того, чтобы пользователи не занимались вопросами доработки, отладки и тестирования меняющейся в процессе экспериментирования модели, а были бы полностью сосредоточены на самом имитационном исследовании – корректном задании всех исходных данных, подготовке сценариев исследования, планировании и реализации экспериментов с моделью, а также на глубоком и всестороннем анализе результатов.

Авторами на общецелевом языке C# был разработан специализированный под эту задачу генератор имитационной модели. Генератор работает на основе двух типов данных – неизменных, уже внесенных в модель в рамках исследования данных о производственной системе, а также варьируемых в экспериментах исходных данных о производственном задании, используемых технологиях и оборудовании.

Варьируемые исходные данные на вход генератора подаются в виде трех MS Excel файлов, созданных по строго определенному формату:

- сменно-суточное задание или производственный план работы цеха на определенный период времени, файл «Выгрузка операций»; данный файл готовится в подсистеме планирования MES системы предприятия;
- данные о технологических процессах, применяемых в цехе (последовательность операций, нормативы времени их применения, используемое оборудование и т.д.), файл «Технологии»; эти данные подготовлены и предоставляются в готовом виде специалистами предприятия;
- данные о логистической подсистеме цеха (используемое транспортное оборудование, его характеристики и зоны работы, параметры и расположение мест

временного хранения и т.д.), файл «Метаданные»; структура этого файла и его наполнение сформированы в процессе исполнения работы авторами статьи и специалистами предприятия.

Данные файлы могут изменяться от одного эксперимента к другому. Например, с помощью MES системы создается другой производственный план или пользователь вносит изменения в технологию обработки. В результате, автоматически может изменяться и сама модель. В самом общем виде, концепция работы генератора моделей показана на рис. 2.

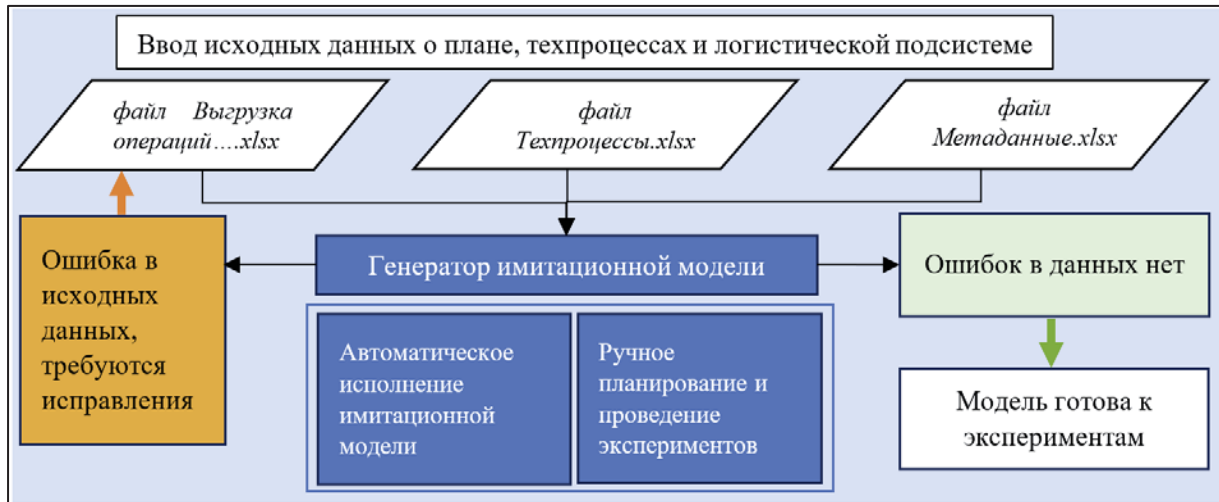


Рис. 2. Концепция работы генератора моделей

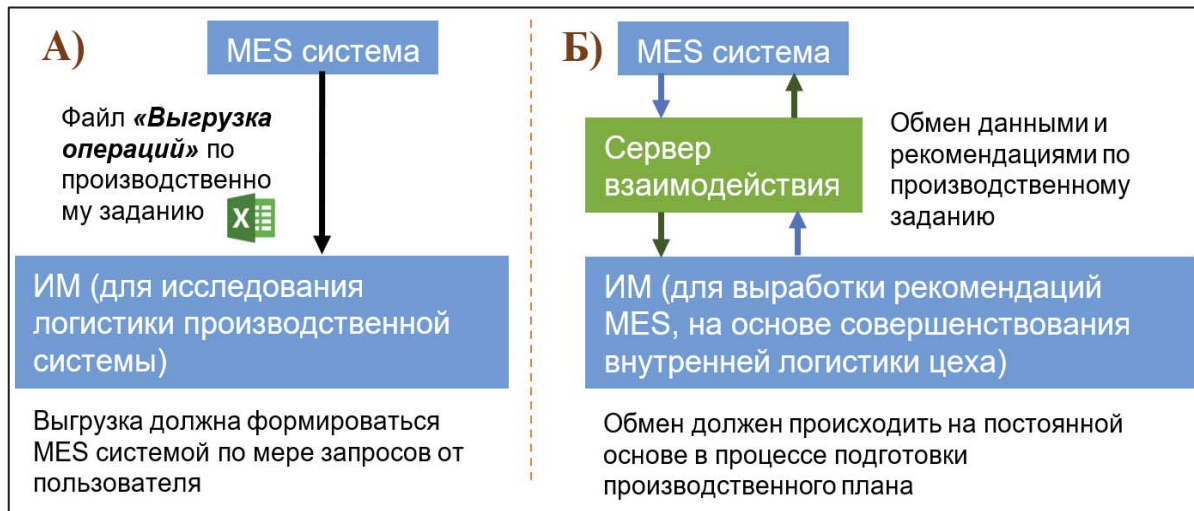
Необходимо отметить, что в генераторе реализованы различные алгоритмы верификации исходных данных, выгруженные автоматически MES системой – проверка логической последовательности операций, анализ корректности задания дат начала и завершения, соответствия технологии запланированного для использования оборудования и т.д.

В результате работы генератора автоматически находится ошибка в данных, которую нужно устранить, либо создается имитационная модель на языке GPSS World Core [6] с динамическим вызовом через PLUS процедуры дополнительных модулей на языке C#. При этом гарантируется безошибочная и правильная работа модели.

Как уже говорилось, в зависимости от уровня взаимодействия с MES системой, данная модель может использоваться в двух направлениях:

а) при стратегическом исследовании внутренней логистики производственной системы;

б) выступать интеллектуальным подсказчиком для оперативного совершенствования разрабатываемых производственных заданий для MES системы.



Рису. 3. Возможные варианты использования имитационной модели

В первом случае необходимо на основе созданной модели разработать имитационное приложение интуитивно понятное и удобное для использования пользователями – руководителями и аналитиками цеха. Во втором случае требуется создать максимально автоматизированное приложение с минимумом пользовательского интерфейса и максимумом формализованных рекомендаций для аналитиков подразделения предприятия, эксплуатирующих MES систему.

Имитационное приложение для исследования логистики

На основе сгенерированной имитационной модели для проведения исследования инструментами среды моделирования GPSS Studio [7], было разработано имитационное приложение.

В данном случае нет этапов классической разработки модели и ее отладки, так как модель создается по технологии No Code, а сразу на основе автоматически сгенерированной модели конструируется приложение. Поэтому был создан проект «Логистическая имитационная модель цеха» и файл с автоматически сгенерированной модели был размещен во вкладку дерева проекта – «Текст модели». Далее для реализации принципа упрощения взаимодействия пользователя с моделью и приближения диалогов ввода/вывода к предметной области исследования была проведена разработка полноценного интерфейса пользователя с моделью с использованием инструментов среды моделирования GPSS Studio и дополнительных доработок с использованием языка C#.

Стандартными инструментами среды моделирования были сконструированы формы ввода/изменения файлов MS Excel с исходными данными о производственной системе (S_u) и наиболее важных параметров (факторов) о логистической подсистеме ($S_{лц}$).

Таковыми факторами логистической подсистемы являются: длительность логистических операций, количество персонала для обслуживания кранового оборудования, график работы цеха и т.д.

Пример формы ввода исходных данных в приложении, приведен на рис. 4.

Рис. 4. Форма ввода исходных данных

Для более детального анализа отклика системы $S_{ц}$ на изменение факторов в подсистеме $S_{лц}$, при проведении экспериментов были выделены наиболее значимые по мнению пользователя показатели модели. Например, занятость транспортного оборудования, заполненность MBX, время исполнения заказа и т.д.

На основе введенных факторов и показателей были разработаны типовые формы для планирования экспериментов с моделью в процессе исследования – одиночных экспериментов, серий экспериментов, оптимизирующих экспериментов (рис. 5).

Логистическая имитационная модель цеха 85 ЧМЗ					
Ввод данных					
Метод планирования экспериментов:					
Пресеты					
Автоматическое построение плана с использованием шага					
Факторы	Целевые показатели	План серии экспериментов	Параметры метода		
Название	Шаг	Минимальное значение	Максимальное значение	Участует	
Длительности операций, %	15	5	100		
Кол-во операторов кранов	1	1	15		
Время перемещения оператора крана, мин	1	3	3		
Кол-во тележек, % от макс. MBX	15	5	100		
Нерабочее время/Пересменка 1 - Активно	1	0	0		
Нерабочее время/Пересменка 1 - С, час	1	12	12		
Нерабочее время/Пересменка 1 - С, мин	1	0	0		
Нерабочее время/Пересменка 1 - До, час	1	12	12		
Нерабочее время/Пересменка 1 - До, мин	1	0	0		
Нерабочее время/Пересменка 2 - Активно	1	0	0		

Рис. 5. Планирование экспериментов в приложении

Была проведена специальная доработка в GPSS Studio для реализации возможности автоматической генерации новой модели после завершения редактирования MS Excel файлов в форме ввода данных и замену на ее текущей модели перед запуском моделирования.

Кроме использования стандартных для GPSS Studio форм вывода (стандартный отчет, динамика результатов, диаграммы Ганта и др.), разработан ряд специальных интерактивных форм представления результатов моделирования. Для более предметного и привычного для специалистов предприятия анализа функционирования производственной системы разработана следующая серия специализированных интерактивных форм (отчетов):

- диаграмма выполнения операций с плановыми и фактическими временами исполнения за весь период моделирования;
- диаграмма загрузки оборудования, позволяющая проанализировать плановую и фактическую загрузку;
- анимация для анализа динамики передвижения транспортного оборудования и заполняемости MBX;
- итоговый сравнительный отчет в виде MS Excel файла с множеством специализированных вкладок;
- три типа диаграммы исполнения заказов (времена начала и окончания, длительность исполнения, используемое оборудование и т.д.).

На рис. 6 приведены некоторые из разработанных стандартных и специализированных форм – диаграммы Ганта (по времени исполнения и по использованию оборудования), итоговый отчет в виде MS Excel файла, отчеты с анализом времени исполнения заказов (ВПП) и изменения времени пролеживания в зависимости от параметров логистической подсистемы.

В ходе проведения исследования с помощью инструментов подсистемы планирования экспериментов были реализованы различные сценарии моделирования в виде серий экспериментов.

Пример результатов, полученных в одной из таких серий, приведен на рис. 7.

В данной серии анализировалось влияние изменения количества операторов кранов на общее количество передвижений и общая длительность передвижений операторов кранов за период моделирования (за полгода). По результатам серии видно, что использование более 6 операторов кранов практически не влияет на анализируемые показатели.

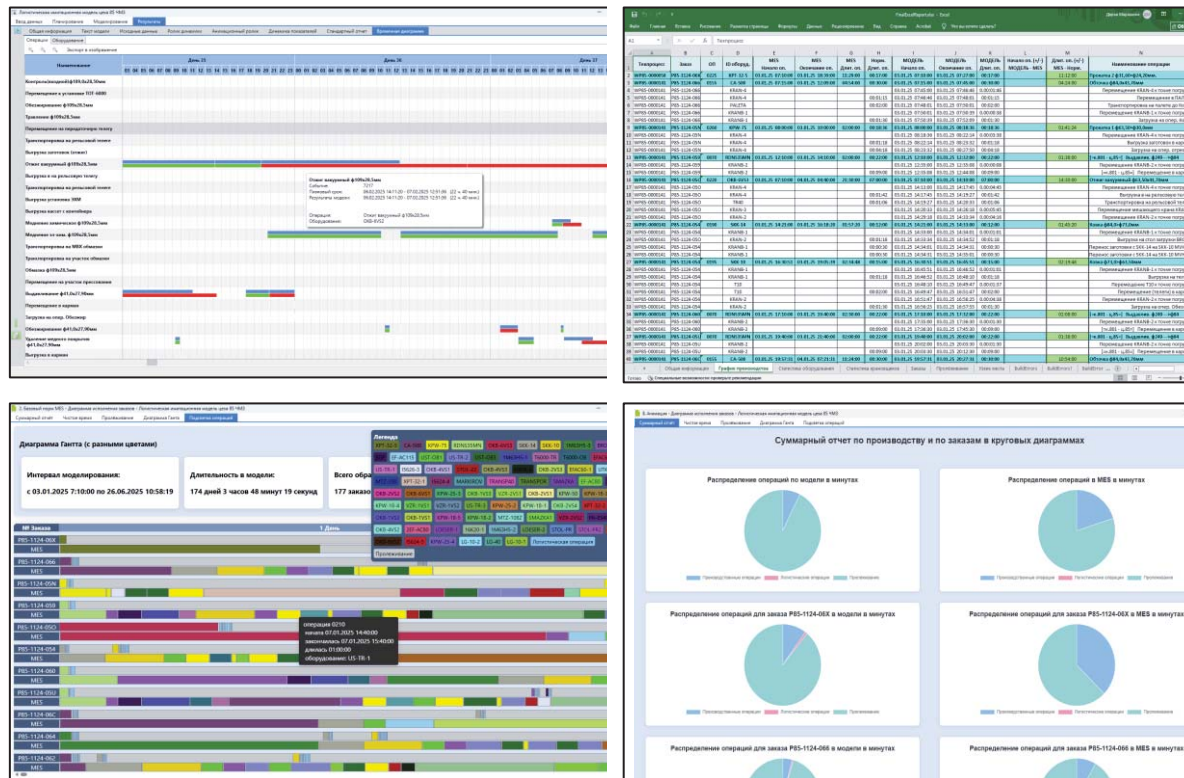


Рис. 6 . Примеры вывода специализированных форм для анализа

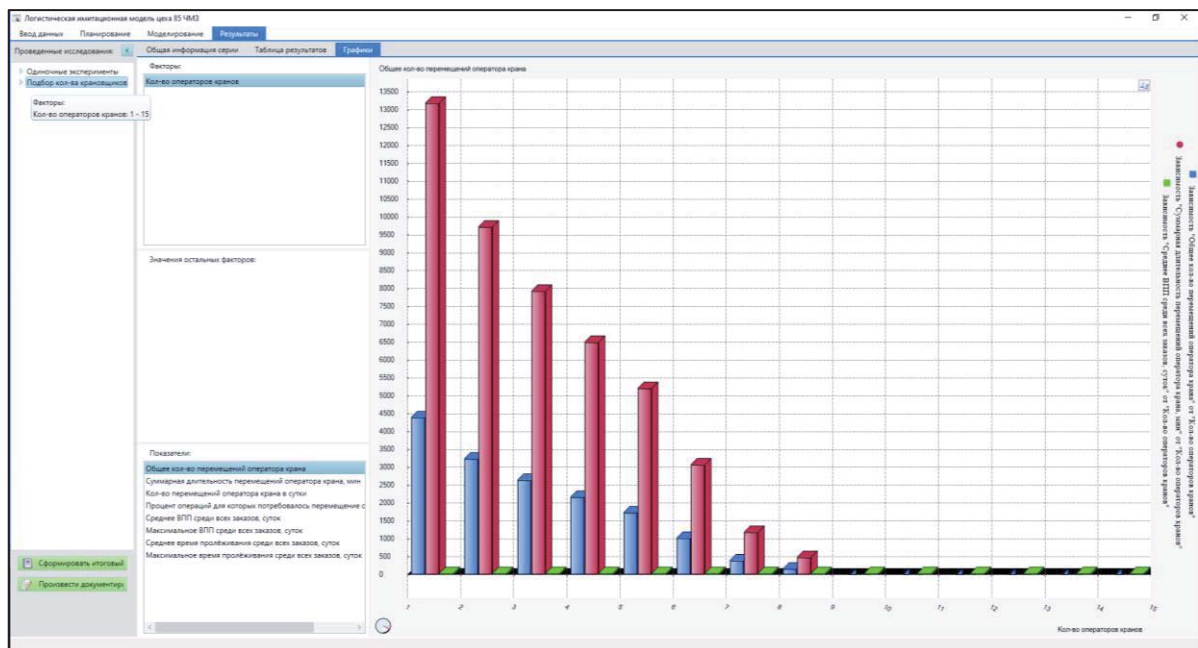


Рис. 7. Зависимости основных показателей от количества операторов крана

Разработанное приложение было использовано для проведения детального исследования логистической подсистемы, определения ее «узких мест» и поиска различных вариантов их устранения. К сожалению, детали и полученные результаты имитационного исследования не могут быть в полной мере представлены в данной статье.

Перспективы использование модели в системе оперативного планирования

Результаты работы с имитационным приложением показали, что за счет расшивки «узких мест» подсистемы внутренней логистики цеха может быть достигнут важнейший для предприятия эффект – снижение времени протекания процессов и объемов незавершенного производства. Данный эффект может быть существенно увеличен за счет комплексного и итеративного использования ИМ и MES. Методически, на каждой итерации для этого необходимо реализовать один или несколько стандартных сценариев. Это может быть либо один обычный эксперимент, серия экспериментов, оптимизирующий эксперимент или их любая комбинация. По их результатам каждого сценария могут быть сформулированы конкретные рекомендации для последующего их использования в MES системе при разработке производственных заданий на любой горизонт планирования. Например, по количеству используемого транспортного оборудования и обслуживающего их персонала, возможностям сдвигам «влево» дат начала основных производственных операций, параллельного исполнения логистических операций и т.д.

По сути, имитационная модель может выступать интеллектуальным подсказчиком для MES системы, как было показано на рис. 3 (вариант б). Но для этого необходимо провести существенные доработки и изменения имитационного приложения, созданного для стратегического исследования.

Во-первых, должен быть расширен и доработан модуль формализации рекомендаций, выработанных имитационной моделью - для однозначного понимания и учета их в MES системе. Причем данные рекомендации должны формироваться автоматически без участия пользователя, по завершению реализации выбранного сценария.

Во-вторых, необходимо разработать сервер взаимодействия модели с подсистемой планирования. Вероятней всего для достижения максимального эффекта потребуется не однократное, а итеративное использование связки ИМ – MES. Количество итераций может быть любым, и ограничено лишь временем, имеющимся на производстве для получения плана. В случае построения сменно-суточного задания – это не более 15 минут и больше – для при разработке недельного, месячного или более длительного плана.

На предприятиях, где в системе MES ее логистическая часть учитывается в самом общем виде (на практике их действительно очень много), снижение ВПП и НЗП за счет оптимизации логистики исключительно актуально.

В-третьих, для ускорения работы модели с MES системой не нужен интерфейс по вариации исходных данных. Необходим лишь выбор требуемого сценария, да и тот может быть однотипным. В этом случае модель должна запускаться на исполнение и в качестве результатов моделирования, после обработки модулем формализации рекомендаций, передает в MES рекомендуемые корректировки по основным используемым ресурсам и датам начала основных технологических операций (при возможном их сдвиге по времени). В сценарий имитационного исследования может входить и формирование оптимизирующих инструментов средствами среды моделирования GPSS Studio.

Базис для формирования интеллектуальных подсказок уже заложен в созданном нами имитационном приложении для стратегического исследования. Примеры таких подсказок, приведены на рис. 8.

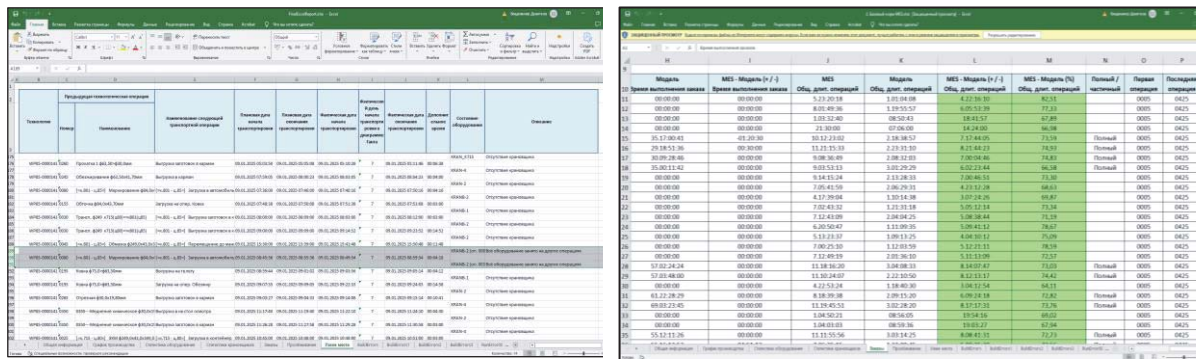


Рис. 8. Примеры обнаружения «узких мест» и потенциала снижения ВПП

На основе существующего генератора имитационной модели цеха и опыта использования имитационного приложения для стратегического исследования в будущем может быть создано принципиально другое приложение – цифровой двойник планирования производственного задания цеха, работающее в максимально автоматизированном режиме и в ритме принятия решений по разработке и утверждению производственного задания.

Заключение

При выполнении работы по анализу внутренней логистики цеха были получены следующие основные результаты:

- проведена формализация работы внутренних логистических процессов в рамках производственной системы цеха;
- представлена концепция и осуществлена программная реализация генератора имитационных моделей на основе динамически изменяющихся файлов с исходными данными о производственной системе;
- разработаны и реализованы алгоритмы верификации исходных данных для создания логически выверенной и адекватной имитационной модели;
- на основе модели создано имитационное приложение для проведения стратегического исследования логистической подсистемы;
- сделан практический задел и сформулированы перспективы использования созданной имитационной модели в связке с MES системой для разработки производственных заданий на различные горизонты планирования.

Литература

1. Реестр программного обеспечения «Платформа имитационного моделирования Alina GPSS» [Электронный ресурс], – Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/305965/?sphrase_id=965110 (дата обращения: 16.09.2025).
2. PlantTwin от Amalgama «Инструмент имитационного моделирования дискретных производств» [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://plant-twin.ru/> (дата обращения: 16.09.2025).
3. «Инструмент моделирования AnyLogic» [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://the.anylogic.company/> (дата обращения: 26.08.2025).
4. «SIMIO Digital Twin Simulation Software» [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.simio.com/> (дата обращения: 16.09.2025).
5. «Решения SIMUL8» [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.simul8.com/> (дата обращения: 16.09.2025).

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022660098 Российская Федерация. GPSS World Core: № 2022619474: заявл. 25.05.2022: опубл. 30.05.2022 / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов, Ш. Д. Хайбуллин; правообладатель ООО «Элина – Компьютер».
7. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. Пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов; под общ. ред. В.В. Девяткова. — М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. 283 с.