

УДК 658.512

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КАК СРЕДСТВО АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИИ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Топаж А.Г., Гиндин И.Б., (Санкт-Петербург),
Чеславский А.В. (Алматы, Казахстан)

Введение

Планирование производственной логистики малых и средних предприятий, как правило, строится на основе одного из двух подходов, которые условно можно назвать принципами вытягивания или выталкивания (Фролов, 2010; Vollmann, 1997).

«Вытягивающая» система планирования (Pull Scheduling) характеризуется тем, что сущности материального учета (ресурсы, полуфабрикаты, выпускаемая номенклатура изделий) подаются («вытягиваются») с предыдущего на следующее звено производственной цепочки по мере необходимости, то есть тогда и в том количестве, когда и сколько их требуется для следующей технологической операции. А первопричиной, инициирующей процесс этого последовательного вытягивания, выступают заказы на поставку потребителям конечной продукции, поступающие из отдела продаж. Таким образом, план производства на конкретных рабочих центрах формируется путем «развертывания» заказов на конечную продукцию от конца к началу согласно технологическому маршруту ее производства из комплектующих материалов и полуфабрикатов.

«Выталкивающая» система планирования (Push Scheduling) отвечает такому движению материальных потоков, когда ресурсы (входы) следующей технологической операции подаются на нее с предыдущих звеньев процесса согласно заранее сформированному графику поставок. То есть выходы каждой операции автоматически «проталкиваются» дальше по технологическому маршруту и становятся запасом незавершенного производства на входе следующей операции. Как правило, главным источником исходных данных для выталкивающего планирования выступает заданная интенсивность поступления первичного сырья, а сама эта методология наиболее подходит для предприятий непрерывного производства, работающих на склад.

Вместе с тем, существует достаточно масштабный пул специфических производств, где в системе одновременно присутствуют оба внешних инициирующих потока заявок – поступление исходного сырья и пользовательские заказы на отгрузку конечной продукции. Причем оба этих потока одинаково важны, то есть система планирования должна решать нетривиальную задачу их согласования и балансировки с целью достижения одновременно двух целей – своевременному исполнению максимального количества заказов и наиболее полному потреблению сырья. Примеры производства, требующего подобной «гибридной» системы планирования материальных потоков, можно встретить в деревообделочной, кожевенной, фармацевтической и других отраслях промышленности.

В статье описывается созданный авторами прототип прикладного программного решения – реализация алгоритма планирования материальных потоков одностадийного (однопередельного) производства, управляющегося одновременно входным потоком поступающего сырья и выходным потоком пользовательских заказов. Разработанное приложение может быть отнесено к классу продуктов APS (Advanced Planning and Scheduling) для специфического типа предприятий (Vieira et al., 2021). Для анализа, верификации и наглядного представления результатов работы данного движка нами

также была разработана специализированная имитационная модель, позволяющая отследить в динамике основные характеристики изучаемого производственного процесса (складские запасы сырья и выпускаемой номенклатуры, загруженность рабочих центров, степень выполнения заказов на отгрузку) при условии использования его в качестве прикладного инструмента диспетчеризации производственных заданий. Изучение вычисляемых на основе расчетов интегральных показателей эффективности модельного производства позволяет сделать вывод о степени применимости и востребованности созданного движка материального планирования, а также определить его наиболее адекватные параметры и настроечные коэффициенты.

Постановка задачи планирования материальных потоков

Прежде всего, опишем основные черты предметной области, подлежащей автоматизации, то есть перечислим базовые свойства того производственного процесса, планирование которого составляет функционал разработанного движка

1. Технологически-логистический процесс производства описывается всего лишь двумя укрупненными этапами – поступлением материала (под этим термином мы далее будем понимать вход основного производственного процесса, то есть как собственно материалы, так и полуфабрикаты, являющиеся продуктами более ранних переделов, не рассматриваемых как предмет автоматизации) и производством конечной продукции.

2. Существует некоторое ограниченное число разновидностей материала и, в свою очередь, некоторое число разновидностей конечной продукции.

3. Первый этап (поступление материала) описывается как внешний заданный поток, то есть он не подлежит планированию или оптимизации. Интенсивность поступления материала задается как его валовый объем за единицу времени и предопределенное квазистатическое распределение всего этого объема по разновидностям.

4. Произведенный материал поступает на склад ограниченной вместимости. Таким образом, материальный поток «производство материала – склад» работает по принципу выталкивания.

5. Производство конечной продукции осуществляется на заданном числе условных рабочих центров, пропускная способность которых является ограничением на потенциальную скорость выпуска. Время производства единицы каждой разновидности конечной продукции на конкретном типе рабочего центра задано явным образом.

6. Вследствие различных обстоятельств реальный выпуск продукции на том или ином производящем рабочем центре может отличаться от идеального. Определенный процент изготовленной партии разновидности конечной продукции после прохождения процедуры ОТК может быть переведен в другую разновидность или в другие разновидности (например, с понижением сортности), а какой-то процент может быть полностью забракован. Статистические величины прогнозируемого процента пересортицы и брака известны и заданы. Другой случай, приводящий к необходимости учета нескольких выходов одного технологического процесса – операция, в ходе которой естественным путем получается несколько конечных продуктов разного вида, каждый из которых имеет отдельную потребительскую ценность и служит предметом продажи. Этот аспект (множественность выхода исследуемой операции передела) должны быть соответствующим образом учтен в процедуре планирования производства и оптимизации материальных потоков.

7. Задана спецификация (BOM – Bill Of Materials) производства конечной продукции из одного или нескольких материалов. То есть указано, какие

разновидности материала и в каком количестве идут на производство одной единицы конкретной разновидности конечной продукции.

8. Спецификация конечной продукции задана не жестко, а с указанием возможной вариантности. Иными словами, для одного и того же конечного продукта может быть указано несколько допустимых конфигураций его состава. Иногда эта вариантность обуславливается просто списком допустимых замен по конкретным позициям спецификации (возможность использовать несколько разновидностей материала в конкретной роли), но в более сложном случае можно говорить именно об альтернативном процессе изготовления, когда для различных вариантов может изменяться и число и роли потребляемых материалов. Из допустимых вариантов технологического состава (ВОМ) один и только один определяется как основной. Прочие являются альтернативами, применяемыми в случаях нецелесообразности применения основного варианта. Например, по некоторым позициям базовой спецификации конечной продукции, как правило, допускается замена указанного материала на сходный материал более высокого качества.

9. План производства конечной продукции регулируется заданным перечнем утвержденных заказов на поставку. Каждый заказ на поставку характеризуется потребителем, допустимым временным окном его выполнения, формальным показателем важности или приоритетности, а также списком позиций, каждая из которых представляет собой сведения о том, какая разновидность конечной продукции в каком количестве и по какой цене должна быть отгружена потребителю в рамках этого заказа.

12. Формулируемая задача оперативного планирования производства или оптимизации материальных потоков состоит в составлении сменного плана работы производящих рабочих центров в терминах:

- a. выполняемых позиций тех или иных заказов на поставку с указанием их очередности (первая переменная планирования) и
- b. выбора конкретных вариантов изготовления каждой разновидности конечной продукции из тех или иных разновидностей материала в случае наличия допустимых замен в ВОМ (вторая переменная планирования).

13. Сформированный план производства однозначно определяет нормы использования различных разновидностей материала, то есть соответствующий поток «склад – потребление» работает по схеме вытягивания. Обобщенная схема технологического процесса, для которого решается сформулированная задача оперативного планирования производственной логистики, представлена на рис. 1

14. Сформированный план производства должен удовлетворять следующим ограничениям:

- a. Непревышение пропускной способности для всех рабочих центров (производственных участков)

- b. Наличие всех необходимых разновидностей материала в необходимом количестве. При этом учитываются как наличие «живых», гарантированных остатков на складе, так и плановый прогноз динамики его поступления на всем горизонте планирования.

- c. Удовлетворение (закрытие) всех вошедших в план позиций заказов с учетом ожидаемой пересортицы и отбраковки конечной продукции, а также возможных запасов на складе готовой продукции, оставшихся от выполнения предыдущих производственных планов.

15. Сформированный план (расписание производственных заказов) должен обеспечивать наилучшие показатели для следующих критериев (вопрос их

комплексирования и формального представления рассмотрен в следующем разделе статьи):

- a. Удовлетворение всех позиций в рамках одного заказа (как можно более быстрое исполнение заказов целиком, а не множества позиций в разных заказах)
- b. Максимально быстрое выполнение заказов более высокого приоритета
- c. Уменьшение количества неостребованных остатков различных разновидностей на складе готовой продукции
- d. Избегание переполнения склада материала
- e. Балансировка потребления материала по его разновидностям (стремление к поддержанию остатков на складе в количествах пропорциональных текущих интенсивностям потребления)
- f. Максимизация прибыли по заказам, вошедшим в текущий сменный план (стремление при равных приоритетах выполнить раньше более денежные заказы)
- g. Соблюдение ранее запланированной очередности изготовления партий в пределах заданного «замороженного» горизонта (преимущество планов при постоянном скользящем перепланировании)
- h. Минимизация числа переналадок рабочих центров на выпуск иной разновидности конечной продукции

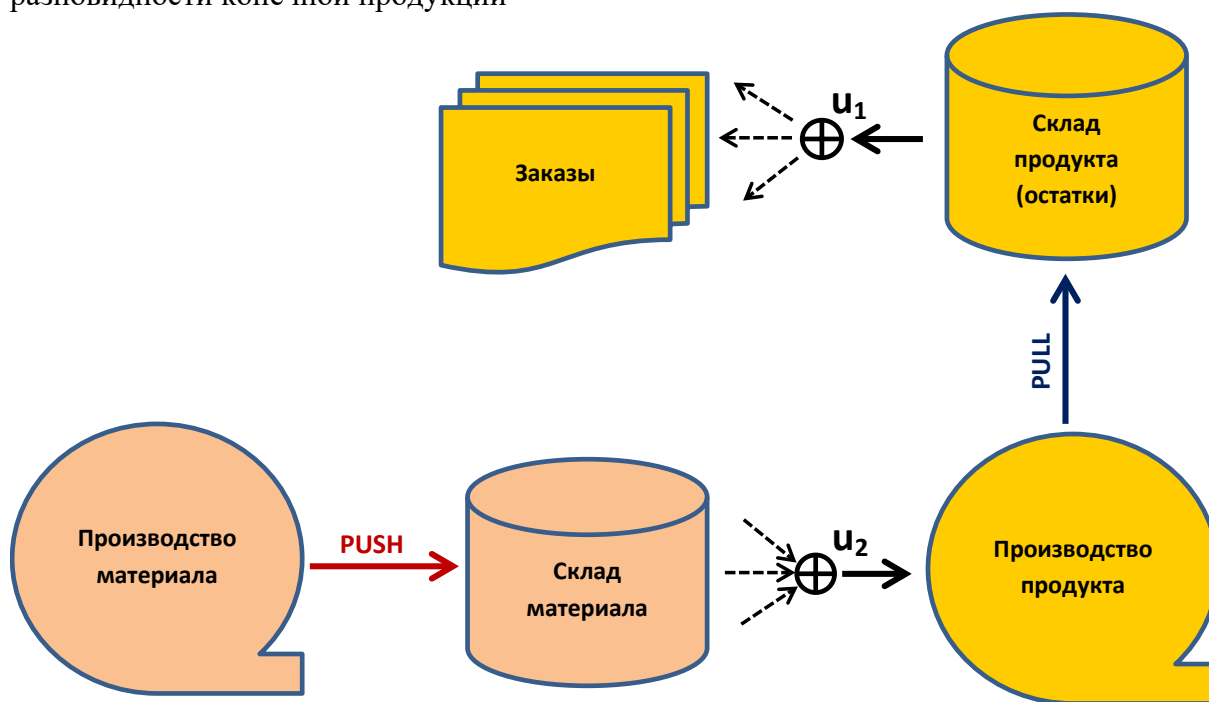


Рис. 1. Обобщенная схема планируемого производственного процесса

Реализация алгоритма оперативного планирования материальных потоков

В текущей версии описываемой системы оперативного планирования материальных потоков в качестве алгоритмического процессора мы использовали библиотеку оптимизации *OptaPlanner* (www.optaplanner.org). *OptaPlanner* — это свободно распространяемая с исходными кодами Java-библиотека классов, позволяющая решать широкий спектр комбинаторных задач. Ее логическое ядро содержит большой набор встроенных процедур, реализующих математические методы нахождения допустимого начального приближения (например, «первый подходящий» или «лучший из подходящих») и собственно итеративного поиска наилучшего решения в задаче дискретной оптимизации (алгоритмы локального поиска, ветвей и границ, табу, имитации отжига и большой перечень эвристических методик). Разработчиками

декларируется, что *OptaPlanner* способен находить приемлемое (квазиоптимальное) решение за разумное время для решения широкого перечня типов NP-полных задач планирования и составления расписаний. При этом подбор наиболее подходящего метода оптимизации для любого конкретного случая происходит автоматически. Текущая реализация библиотеки также включает в себя возможность распараллеливания процесса поиска решения по нескольким вычислительным потокам с сохранением единого механизма инкрементального подсчета и хранения критерия качества, что позволяет значительно уменьшить время достижения конечного результата (De Smet, Wauters, 2021).

Основная задача, которую необходимо решить при использовании *OptaPlanner* для решения конкретной задачи оптимизации, заключается в создании специального адаптера, т.е. в представлении понятий и сущностей предметной области или модели в терминах программного интерфейса (API) этого решателя. При этом следует отметить, что библиотека *OptaPlanner* представляет собой надстройку высокого уровня над стандартным синтаксисом Java, что позволяет описать конкретную проблему в привычных предметно-ориентированных концептах (без необходимости строгой формализации ее на математическом языке переменных, уравнений и ограничений). Сущность процедуры сведения при этом технически состоит в специальном аннотировании определенных классов информационной модели. То есть необходимо указать, какие ассоциативные связи (переменные планирования) для каких экземпляров сущностей (объектов планирования) следует варьировать и подбирать из заранее определенных наборов для достижения оптимальной величины указанного критерия качества (максимизируемого параметра или группы параметров).

В разработанной для сведения к решателю *OptaPlanner* информационной модели отражены некоторые соглашения и приемы, которые позволяют снизить размерность задачи планирования в полной постановке на длительном горизонте, сводя ее к последовательному решению нескольких частных однопараметрических задач. Так, единственной переменной планирования в предложенной формализации выступает указатель ассоциативной связи производственного задания на вариант спецификации соответствующего техпроцесса. Идея состоит в том, что в режиме препроцессинга (подготовки задачи для решения) происходит автоматическое порождение формальных производственных заданий для каждой не полностью закрытой позиции каждого заказа, находящегося в работе. Набор допустимых для выбора вариантов спецификации у каждого порожденного задания включает в себя варианты спецификации соответствующего техпроцесса и дополнительно пустой указатель. Если в результате решения оптимизационной задачи некоторые формальные производственные задания получают в качестве значения переменной планирования этот нулевой указатель, то это означает, что это фиктивные задания («пустышки»), которые на самом деле фактически отсутствуют для данного такта планирования.

Ориентируясь на перечень всех «реальных» производственных заданий в полученном элементарном плане или расписании, можно вычислить соответствующие ему показатели качества этого варианта решения. Для этого необходимо сначала выстроить полученные задания в порядке их выполнения. В реализованном алгоритме это делается автоматически, исходя из анализа матрицы головных продуктов и со-продуктов технологических процессов. При этом в первую очередь всегда выполняются те задания, в которых вследствие пересортицы и отпада в качестве вспомогательных продуктов производится определенный задел для следующих заданий. На втором этапе вычисления критериев сменный план искусственно «проигрывается», и по результатам этого мини-моделирования вычисляется динамика складских запасов, закрываются отдельные позиции и целые заказы, отслеживается

степень загрузки рабочих центров и, в конечном счете, вычисляется оценка критерия качества текущего варианта решения. Полученная формализация задачи оптимизации производственного плана может быть классифицирована как одна из специфических разновидностей математической проблемы «упаковки рюкзака»

В текущей версии планировщика реализована трехуровневая упорядоченная система взвешенных критериев оптимальности. При этом формула критерия для каждого уровня представляет собой взвешенную сумму частных показателей, учитываемых на данном уровне. «Играя» коэффициентами весов, можно задавать важность каждого из упомянутых показателей или даже исключать весь уровень критерия из рассмотрения. А явно заложенное в один из показателей интегрального критерия оптимальности требование сбалансированного потребления поступающих материалов позволяет разбить процедуру планирования производства на длительном горизонте на ряд последовательных актов планирования работ на коротком временном интервале (например, в течение одной рабочей смены). При этом результаты планирования на предыдущем этапе (степень выполнения заказов и складские запасы материала и конечной продукции) закладываются в качестве исходных данных для следующего краткосрочного шага планирования. Такой подход, во-первых, позволяет существенно понизить размерность задачи и повысить вычислительную эффективность алгоритма. Во-вторых, подобное упрощение позволяет пренебречь конкретной динамикой прихода материалов на отдельном шаге – допустимо полагать, что весь объем произведенных материалов за очередную смену становится доступным либо уже в начале, либо, наоборот, только в ее конце.

Описанное программное решение реализовано нами в виде библиотеки классов Java со специфицированным программным интерфейсом взаимодействия (API). Оно содержит методы и алгоритмы сведения поставленной задачи планирования к понятиям *OptaPlanner*, ее препроцессинга и обработки результатов, а также непосредственного обращения к встроенному решателю для получения текущего квазиоптимального решения. В качестве простейшей базы данных информационной поддержки библиотеки планирования используется файл формата MS Excel. В нем на отдельных закладках задаются данные статического характера, описывающие управляемый производственный процесс (перечни материалов, рабочих центров и конечной продукции с их базовыми характеристиками, нормы выхода продукта и потребления материалов, характерные размеры партий, варианты спецификации и т.д.) Другие закладки этого же файла содержат оперативные сведения о динамике поступления материалов и заказах на поставку, требующих исполнения.

Имитационная модель как инструмент верификации планировщика материальных потоков

Удобным инструментом, позволяющим всесторонне проанализировать, верифицировать и наглядно визуализировать результаты созданной работы библиотеки планирования материальных потоков, является дискретно-событийная имитационная модель. Подобная модель реализована авторами настоящей работы в среде многоподходного имитационного моделирования AnyLogic. Исходные данные статического характера об имитируемом производственном процессе, то есть описание техпроцессов изготовления и спецификации конечной продукции читаются моделью из файла информационной поддержки движка оперативного планирования. В логике модели достаточно просто описывается стохастический процесс поступления новых заказов на отгрузку конечной продукции (как случайный поток заявок соответствующего типа) и поступления материалов (как периодический триггер, мгновенно увеличивающий складские запасы материалов на вычисленную величину

сменного пополнения). Вызов процедуры планирования производственных заказов из внешней библиотеки также осуществляется с заданной периодичностью модельного времени, отвечающей элементарному акту перепланирования (одна рабочая смена). После чего полученное расписание исполняется в модели «как есть», при этом происходит визуальное обновление условных пиктограмм заказов в соответствии с долей закрытых в них позиций, а также уровней складских запасов и загрузки рабочих центров.

Пример графического интерфейса созданной демонстрационной модели показан на рис. 2. Построенное решение представляет собой специфический пример встраивания внешнего модуля оперативного планирования в имитационную модель исследуемой системы автоматизации. При этом в отличие от ранее описанных решений подобного рода (Торай, Таровик, 2023), в данном случае стержневым элементом информационной системы является именно движок планирования, а имитационная модель выступает в роли вспомогательного инструмента (графической оболочки) для его анализа и верификации.

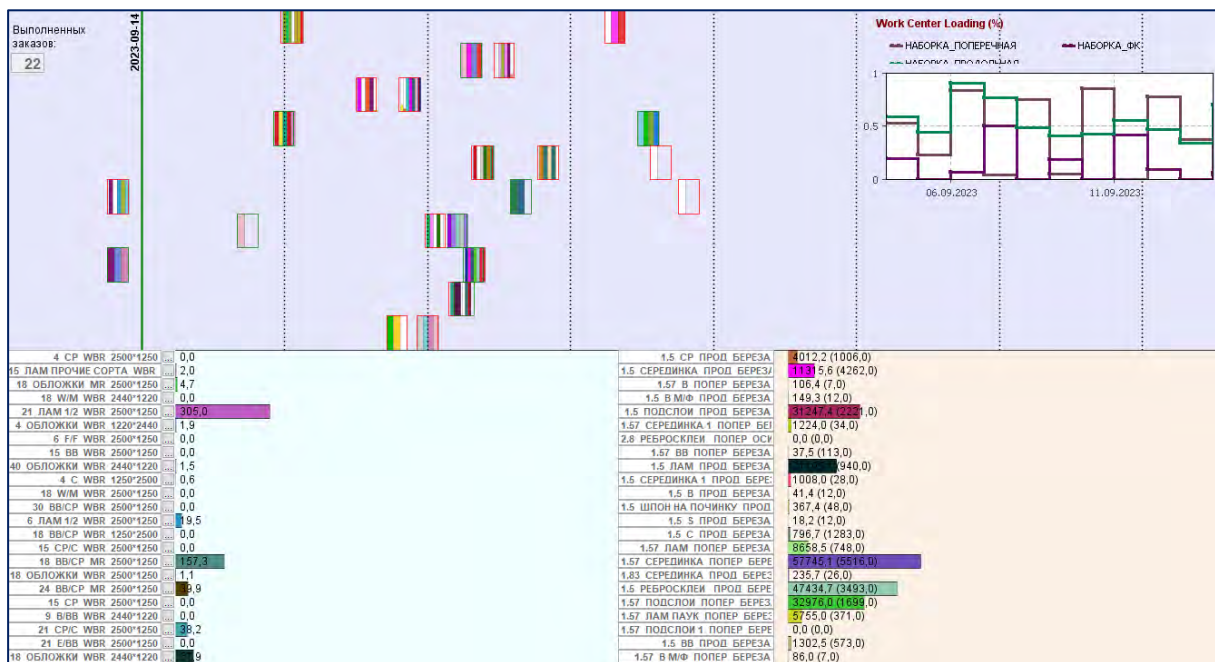


Рис. 2. Интерфейс демонстрационной имитационной модели в режиме имитации исполнения полученного из внешнего движка оперативного плана производства

Результаты и обсуждение

Тестирование работоспособности разработанной интегрированной информационной системы, состоящей из имитационной модели и движка оперативного планирования производственных заказов, проводилось нами на примере данных производства фанеры на реальном производственном объединении. Здесь в качестве материалов выступают разные сорта шпона, поступающие с заданной интенсивностью с лущильного производства, а конечным продуктом являются различные сорта фанеры, отличающиеся толщиной (числом слоев), сортностью, способом сборки и типоразмерами в плане. Рабочие центры, производительность которых лимитирует потенциальные темпы выпуска фанеры – производственные участки клеевых вальцов.

На рисунке 3 представлены выборочные результаты тестовых прогонов созданной имитационной модели. В серии выполненных имитационных экспериментов сравнивалась эффективность двух подходов к оперативному планированию производства. В первом случае использовался описанный выше движок

комбинаторного планирования, основанный на использовании внешнего решателя *OptaPlanner*. Во втором применялся упрощенный ситуативный или «жадный» алгоритм последовательного выбора заданий на исполнение, опирающийся на принцип FIFO (предпочтительное исполнение позиций наиболее срочных заказов). Можно заключить, что в смысле обоих критериев качества (общая доля выполненных заказов и доля заказов, выполненных в срок) «честный» комбинаторный алгоритм планирования показывает более высокие показатели эффективности, то есть его применение действительно является оправданным.

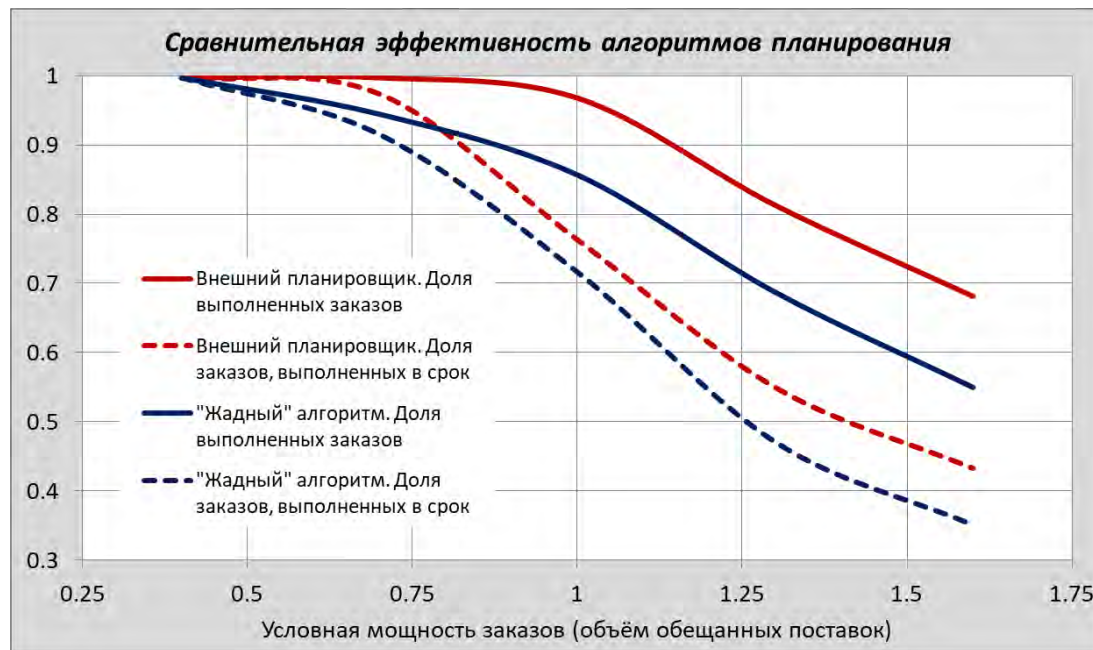


Рис. 3. Результаты сравнение двух подходов к оперативному планированию в имитационной модели производства фанеры

Описанная интегрированная система на данном этапе развития представляет собой только рабочий прототип будущего индустриального решения. Однако даже небольшой опыт его эксплуатации позволяет сделать определенные и конкретные выводы. Представляется, что идея обязательности предварительной проверки и верификации любого предлагаемого инструмента оперативного планирования (APS) перед его внедрением в реальное производство является абсолютно верной. И имитационная модель или цифровой двойник соответствующего предприятия или участка может быть наиболее подходящим полигоном для подобного исследования. Во-первых, в ходе тренинга внедряемого решения в имитационном эксперименте можно будет сразу определить его узкие и проблемные места, а также подобрать наиболее адекватные значения многочисленных настроечных параметров, обеспечивающих его устойчивое функционирование для данного конкретного типа производства. Во-вторых, введение в модель стохастических компонентов позволяет исследовать реакцию изучаемой системы на случайные отклонения от идеальной картины мира, неявно заложенной в любой жесткий алгоритм планирования (изменения в потоках исходных материалов, сбой и неполадки оборудования, пиковые нагрузки и неравномерность распределения номенклатуры по заказам и т.д.) И тем самым провести полноценный анализ рисков в безопасном режиме, то есть в отрыве от реального производственного процесса.

Если отдельно говорить о ценности, которую потенциально несет в себе внедрение инструмента оперативного планирования на основе комбинаторных алгоритмов на производствах описанных выше типов, то это повышение

эффективности использования материальных запасов, которое выражается в возможности наиболее полного удовлетворения клиентского спроса без наращивания объема запасов и оптимизации портфеля заказов (предпочтение наиболее маржинальным заказам, т.е. увеличение выручки). Затраты на содержание запасов и готовой продукции при этом не растут, структура запасов полуфабрикатов становится более сбалансированной, оборачиваемость запасов готовой продукции улучшается. Появляется возможность обоснованного расчета плановой даты исполнения заказа и, следовательно, заблаговременного планирования полной или частичных отгрузок заказа клиенту еще на стадии обсуждения договорных условий.

Литература

1. Фролов Е.Б. Современные концепции управления в производственной логистике. Часть 1. "Выталкивающие" и "вытягивающие" системы планирования // САПР и графика. 2010. № 11 (169). С. 57–61.
2. Vollmann T., Berry W., Whybark D. Manufacturing Planning and Control Systems. Irwin/McGraw-Hill, 1997. 836 p.
3. Vieira J., Deschamps F., Valle P. Advanced Planning and Scheduling (APS) Systems: A Systematic Literature Review // Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions. 2021. P.385–394, DOI:10.3233/ATDE210118.
4. <https://www.optaplanner.org>
5. De Smet, G., Wauters T. (2021) Multithreaded incremental solving for local search based metaheuristics with step chasing // Proc. of the 13th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling - PATAT 2021. Volume I, 87–104.
6. Topaj A., Tarovik O. Operational planning and combinatorial optimization in simulation models of marine transportation systems // Proceedings of the 25th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistic Modeling & Simulation, HMS 2023. doi: 10.46354/i3m.2023.hms.005 <https://www.caltek.eu/proceedings/i3m/2023/hms/005/pdf.pdf>