

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРИМЕРЕ ПРЕДПРИЯТИЙ МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Коровин Д.И., Коротеев М.В., Романова Е.В.

Финансовый университет при правительстве РФ,
Россия, г. Москва, Ленинградский пр., д. 49

mvkoroteev@fa.ru

Аннотация: Процессы планирования на производстве являются неотъемлемой частью бизнес-процессов любого предприятия. При этом имеет смысл определить уровни планирования и указать на известные успешные реализованные системы. Наиболее известным инструментом управления считается применение аппарата ERP-систем. Но на концептуальном уровне задачей ERP-систем является построение сбалансированных планов в реальном режиме времени. При этом оптимизации этих планов внимание не уделяется. По-другому ставится задача в MES-системах, в которых оптимизация локального производственного процесса ставится на первое место. Недостатком можно считать слабые, нежели в ERP системе, связи с бизнес-процессами реализации продукции и закупками ресурсов (в общем случае), задачами финансового планирования и др. Частично эти задачи успешно реализуются в классе систем, известных как CRM-системы, которые оптимизируют маркетинговые стратегии. Нами предлагается система оптимизации месячного плана деятельности мясоперерабатывающего предприятия. В качестве предприятия в базовом варианте выбрана модель предприятия, обладающего всеми подразделениями, необходимыми для реализации производственного цикла, начиная с убоя и заканчивая реализацией (отгрузкой) готовой продукции.

Ключевые слова: промышленное производство, оптимизация производства, имитационное моделирование, математическое моделирование, мясная промышленность, пищевая промышленность

Введение

Список инструментов финансового анализа и планирования весьма существенен. Выбор того или иного ПО этой сферы во многом зависит от предпочтений финансовых аналитиков. Вопросы, оптимизации производственного планирования по параметрам технологической и организационной сферы в этом случае не поднимаются.

Следующий уровень оптимизации – это обычно специализированные приложения организации расписания подачи ресурсов в производственное подразделение – рабочее место, участок, цех и т.д. Задачи решают локальные задачи и могут являться частями MES-систем. Математическая сложность решения задач такого типа в конкретных условиях не дает возможность создать универсальные алгоритмы, поэтому такие сервисы не тиражируются.

В рамках цифровизации бизнес-процессов для обоснования управленческих решений необходимо оперативно анализировать имеющиеся на предприятии массивы информации. В первую очередь – финансовые и сырьевые ресурсы, производственные мощности и технологические возможности, а также потенциал реализации продукции.

Требуются дополнительные инструменты к существующим способам повышения конкурентоспособности предприятий, таким как:

- уменьшение материальной себестоимости и сокращение издержек;
- совершенствование технологий, учёта, продаж, финансовых инструментов и прочее.

Программно-аналитический комплекс должен:

- из множества возможных вариантов закупок, производства и реализации продукции многократно ускорить обоснование наиболее выгодного из них;
- обосновывать указанные варианты на любой период времени, в том числе при подготовке бюджетов;
- оптимизировать использование различных ресурсов, а также интеграцию всех подразделений и процессов - закупки, производственные мощности, управление финансовым, кадровым, клиентским профилем и т. д.;
- анализировать за любой прошедший период (сутки, неделя, месяц) реальные экономические показатели и движение материальных ресурсов предприятия и определять возможные причины отклонений от плановых значений;
- легко интегрироваться в IT- ландшафт предприятия, дополнять его и качественно работать с любым корректным массивом информации.

Другими словами, должна быть возможность:

- делать точные оперативные расчеты на любой разумный промежуток времени с учетом использования имеющихся остатков основных и вспомогательных материалов и перспективы их поставок;
- быстро и эффективно оценивать изменения стоимостных и объемных показателей работы предприятия в зависимости от возможностей производства и применения торговых скидок и предпочтений.

1 Обзор известных моделей

Всесторонний обзор и критика существующей литературы по планированию распределения и оптимизации производства был выполнен в [1]. Проблему гибкого планирования производства рассматривал [2], а теме производительности производственной системы - [3]. Планирование производства решает множество проблем, но проблема объемов и структуры ассортимента продукции с обоснованными ценами является одной из самых важных проблем производственных систем.

Подход целочисленного программирования для планирования процессов смешанной модели был применен в [4]. В статье [5] рассматриваются вопросы выбора временного диапазона, оптимизации смешанного планирования и планирования на основе узких мест с использованием системы программного обеспечения для принятия решений, основанной на методах целочисленного линейного программирования и эвристической процедуре. Работа [6] была посвящена оценке производственных процессов в массовом производстве. Аналитический процесс иерархии и аналитические подходы к сетевым процессам для получения оптимального сочетания продуктов были использованы в [7]. Подход, часто используемый в производственном планировании, это теория ограничений. Одно из применений теории - это выбор ассортимента продукции. Алгоритмы определения ассортимента продукции по теории ограничений представлены в [8, 9]. С другой стороны, в [10] обсуждается неэффективность традиционного алгоритма теории ограничений в решении проблемы множественных узких мест. В этой статье все узкие места использовались для определения совокупного приоритета каждого продукта, а также был предложен многокритериальный подход к принятию решений для проблемы ассортимента продуктов с интервальными параметрами. Модели линейного программирования и смешанного целочисленного программирования для задач планирования производства и мощностей с неопределенным спросом были предложены в [11]. Большое количество требований, которые необходимо соблюдать при планировании, а также их изменчивый характер являются причиной использования моделирования. Представлено много научных работ, в которых продемонстрировано использование различных методов моделирования в процессах принятия решений. Систематический обзор литературы по использованию моделирования дискретных событий для проектирования и эксплуатации производственных систем был разработан в [12]. Основанная на моделировании структура, которая позволяла бы прогнозировать поведение рыночного спроса и производственной системы, была представлена в [13]. Применение компьютерного моделирования для повышения эффективности производственной логистики представлены в [14]. Подход оптимизации моделирования для разработки инструмента поддержки принятия стратегических и операционных решений, был рассмотрен в [15], [17]. Исследование [16] было направлено на объединение подходов к управлению взаимоотношениями с клиентами, планированию и контролю производства с целью более эффективного использования производственных ресурсов для удовлетворения потребностей клиентов. Моделирование также играет важную роль в оптимизации и решении проблем с эндогенной неопределенностью. Метамоделирование, которое объединяет моделирование дискретных событий, адаптивные статистические методы и аналитический анализ очередей, был предложен в [18]. Гибридизация метода поиска по образцу и имитационного отжига была включена в процесс оптимизации [19]. Настоящая сила алгоритма имитационного отжига была проверена на примере планирования промышленного производства. В статье [20] метаэвристический алгоритм «Империалистический конкурентный алгоритм» был применен для решения интегрированной задачи оптимизации ассортимента продукции и аутсорсинга. Другие приложения моделирования описаны в [21, 22].

Имитационное моделирование — построение компьютерных моделей и проведение экспериментов над ними. Оно эффективно в следующих случаях:

- параметров много, а связи между ними не линейны;
- система обладает вероятностным поведением и обратными связями;
- система имеет различные состояния и изменяющуюся траекторию во времени.

Имитационное моделирование позволяет создавать интеллектуальные компьютерные модели производственных и логистических систем, для анализа их характеристик и оптимизации производительности. Цифровая модель дает возможность проводить виртуальные эксперименты без изменений работы текущей системы или до инвестиций в строительство и новое производственное оборудование. Имитационное моделирование — способ проигрывать модель во времени. Однако, при описании системы на языке имитационного моделирования происходит переход на определенный уровень абстракции, что необходимо учитывать, поскольку система в реальности сложнее созданной модели, так как при построении последней учитывались только самые существенные, важные для производства детали.

Один из наиболее часто используемых методов моделирования - Монте-Карло. Метод Монте-Карло, как метод имитации, применим для решения почти всех задач при условии, что альтернативные характеристики могут быть выражены количественно. Построение модели начинается с определения функциональных зависимостей в реальной системе, которые впоследствии позволяют получить количественное решение, используя теорию вероятности и таблицы случайных чисел. Модель Монте-Карло является более гибкой, чем другие имитирующие модели. Обзор использования основанных на выборке методов Монте-Карло для задач стохастической оптимизации был проведен в [23]. Применение многоцелевой оптимизации Монте-Карло для выбора оптимального местоположения новых производственных площадок было представлено в [24]. Имитационные эксперименты имеют особое значение в ситуациях, когда предприятие принимает решение об инвестиционных проектах. Вложение в реальный капитал означает новые возможности для компании и в то же время сопряжено с новыми рисками. Рентабельность и быстрая окупаемость инвестиций также зависят от производственного плана, обеспечивающего надежный и достаточный денежный поток. Анализ рисков инвестиционных проектов с использованием моделирования методом Монте-Карло был выполнен в [25]. В статье [26] показана возможность использования моделирования методом Монте-Карло в процессе оптимизации производственного плана. Цель оптимизации - максимизировать экономическую эффективность инвестиций, измеряемую финансовым показателем чистой приведенной стоимости (NPV), а также, в ней представлена возможность использования моделирования в управлении рисками инвестиционного процесса. В этом исследовании демонстрируются два подхода к оптимизации производственной программы. Первый подход применяет нелинейный алгоритм GRG к оптимизации, но он не учитывает стохастический характер входных переменных и не использует моделирование. Второй подход реализует стохастический характер входов благодаря использованию моделирования Монте-Карло. Последующий анализ результатов моделирования выявляет скрытые факторы риска и возможности достижения цели. Детерминированный подход не учитывает фактическое развитие или изменение переменных, может привести к неправильным решениям, и в случае реализации инвестиционного проекта, к высоким убыткам предприятия. Повышение достоверности прогнозов и качество управленческих решений требует включения динамики в решение. Ограничения этого исследования заключаются в некоторых упрощениях при постановке задачи и построении математической модели NPVа также не учитывалась неопределенность спроса, являющаяся в реальных условиях стохастической переменной, аналогичной цене.

В работе [27] планирование производства связывается с поиском плана заданий для производственной системы, чтобы его фактические результаты с течением времени соответствовали требованиям клиентов с наименьшими затратами. Для этого выходные данные системы, уровни незавершенного производства и завершенные задания являются нестационарными двумерными временными рядами, которые взаимодействуют с временными рядами, представляющими потребительский спрос. Отношения между планом выпуска и его результирующими показателями производительности, оказалось, сложно определить количественно, поэтому была разработана метамодель метода Монте-Карло, для точного отображения динамического, стохастического поведения производства. Модернизированный метод Монте-Карло способен преодолеть отсутствие точности аналитических методов и вычислительной нагрузки, позволяет быстро и точно оценить план выпуска с точки зрения показателей эффективности, которые включают не только ожидания (например, средняя стоимость продукции), но также и отклонения (например, дисперсия стоимости). Время, требуемое данной моделью для оценки, не зависит от сложности реальных исследуемых систем. Созданная в ходе исследования система позволяет в реальном времени оценивать показатели производительности плана выпуска продукции по искомым объемным и стоимостным показателям. Эта возможность оценки встраивается в многоцелевую структуру оптимизации для поиска обоснованной версии плана.

В работе [28] учитывая взаимосвязи производства, качества и обслуживания, предлагается новая комбинированная стратегия для последовательно-параллельной многоступенчатой производственной системы, объединяющей планирование производства, контроль качества и составление графиков технического обслуживания. Со временем машины постепенно изнашиваются, что приводит к снижению надежности машин и качества продукции. Во время производственных циклов, поскольку машины не могут быть остановлены для проверки, информация о качестве продукции используется как альтернативный подход для помощи при принятии решений относительно обслуживания, которые могут улучшить, надежность систем, а также качество продукции. В конце запуска машины проверяются для точной оценки их состояния и проводится капитальный ремонт, если предсказательная надежность ниже порога.

Стратегия техобслуживания направлена на одновременное определение продолжительности производственного цикла, порога контроля качества и порога обслуживания, чтобы минимизировать средний уровень затрат. Для реализации этой идеи разработана стохастическая математическая модель, которая представляет собой сочетание метода Монте-Карло и генетического алгоритма. В [28] показано, что предложенная комбинированная стратегия обслуживания имеет лучшие экономические показатели, чем традиционные стратегии обслуживания в целом.

В данном исследовании, рассматривался только один атрибут качества, который ухудшился из-за состояния машины. Однако, для большей реалистичности, следует учитывать качество со множеством атрибутов. Как вариант, можно исследовать стохастический спрос (например, распределение Пуассона [29] или контролируруемую производительность [30]) в этом контексте.

В современных реалиях важнейшей составляющей устойчивого развития предприятия является его финансовая устойчивость, которая, формируется в процессе производственно-хозяйственной деятельности, определяет согласованность финансовых потоков и отображает стабильное превышения доходов над расходами.

Такой вид устойчивости дает возможность свободного маневрирования финансами предприятия, обеспечивая бесперебойный процесс производства и реализации продукции.

Недостаточный уровень финансовой устойчивости приводит к отсутствию средств, необходимых для развития производства, а также к снижению платежеспособности, а чрезмерное превышение уровня - к увеличению затрат в части излишков по запасам ресурсов и резервам продукции. Таким образом, определение пределов финансовой устойчивости предприятия – это одна из значимых экономических проблем.

Наличие источников формирования запасов – это позитивный фактор финансовой устойчивости, а количество запасов – негативный, из-за этого факта пополнение источников и формирование их структуры, с возможным снижением их уровня, представляют собой наиболее перспективные способы решения задачи выхода из неустойчивого и кризисного финансовых состояний.

Система планирования по остаткам предполагает реализацию неиспользованных ресурсов, не формируя при этом сверхплановых запасов, поскольку в таком случае возможно замедление оборачиваемости или даже замораживание оборотного капитала, что, естественно, приведет к уменьшению финансовой устойчивости. Так как данный фактор порождает замораживание оборотного капитала, замедляя его оборачиваемость, что в результате приводит к снижению уровня финансовой устойчивости.

Из этого следует, что для организации дополнительных возможностей оптимизации запасов, как предпосылок финансово-экономической устойчивости, необходимо использовать имитационное моделирование с целью определения оптимальных параметров по запасам. В [31] предлагается использовать метод имитационного моделирования для оценки вариантов структурного построения складских систем для оптимизации параметров и функционально-стоимостных характеристик, с учетом определенных ограничений по затратам.

В данной ситуации, метод Монте-Карло также является одним из самых востребованных методов имитационного моделирования для анализа финансово-экономической устойчивости. В этом методе при расчете какой-либо системы проводится анализ поведения всех ее компонент. Указанный метод относится к методам статистического моделирования, включает в себя обязательные мероприятия по испытанию модели с помощью множества случайных параметров с заданной плотностью вероятности для определения выходных результатов. С целью моделирования процесса при помощи генератора случайных величин, в данном методе применяются операции, с многократным повтором вычислений на базе полученных случайных данных, вероятностных характеристик рассматриваемых задач. При реализации вышеуказанных мероприятий гарантировано высокое качество статистических

оценок при многократном числе испытаний, что обеспечивает финансовую целесообразность применения рассматриваемого метода для оптимизации запасов предприятия.

Кроме того, данный метод применяется при разработке методики оценки параметров поставки сырьевой продукции, обеспечивающий устойчивость и минимизацию финансовых потерь при реализации товаров на потребительском рынке

2 Описание модели

Перед нами стоит задача описать следующий технологический процесс. На вход должен поступать ресурс, имеющий несколько категорий, которые характеризуют виды животных. Каждый поставщик обладает набором характеристик для каждой категории, которые характеризуют качество животных, а каждая категория животных характеризуется набором параметров, которые определяют впоследствии состав получаемого мяса. На входе определяется процедура отбора поставщика, устанавливаются объемы, фиксируются стоимостные показатели. Спецификой отрасли является тот факт, что для получения определенного вида мяса должно быть закуплено и переработано целое животное, в котором присутствуют и другие компоненты. В поставляемой партии животных обычно бывают животные разных категорий с различными качественными характеристиками (разными составами компонентов). Балансировка поставки мясного сырья является нетривиальной задачей.

В ходе моделирования для описания отдельных технологических процессов мы столкнулись со следующим. Некоторые процессы оказывались доступными (или недоступными) при достижении отдельных индикаторов, определяемых параметрами системы. Для демонстрации приведем пример.

В области допустимых значений $\{0 \leq x_1 \leq 10\} \& \{0 \leq x_2 \leq 10\}$ целевая функция имеет вид

$$F(x_1; x_2) = a_{10}x_1 + a_{20}x_2 + a_0 + \sum_{k=1}^n \text{Ind}_k(x_1; x_2)(a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + a_k)$$

Где

$$\text{Ind}_k(x_1; x_2) = \{1, \text{если } \frac{x_1}{b_{1k}} + \frac{x_2}{b_{2k}} \geq 1, 0, \text{если } \frac{x_1}{b_{1k}} + \frac{x_2}{b_{2k}} < 1$$

В случае $n=2$, имеем, что условие достижения экстремума на границе выпуклой области, которое реализуется в задачах линейного программирования не выполняется. Наша задача - не линейная.



Рис. 1. График целевой функции 1

Можно решать большое количество задач линейного программирования в отдельных областях, в которых сочетания индикаторов различно. Действительно, достаточно было бы проверить все вершины этих областей. Однако, так как в нашем случае границы областей зависят от значений параметров и число этих областей (индикаторов) может быть весьма большим, а размерность пространства переменных существенна, то задача определения этих областей становится нетривиальной.

Таким образом, классические методы решения поставленной задачи оказываются неприменимы.

3 Реализация имитационной модели. Метод Монте-Карло

В ходе решения задачи нами предлагается следующий концепт решения проблемы. Мы разрабатываем первоначальный план решения задачи, который предлагается специалистам, принимающим решения, которые определяют возможность реализации этого плана во вновь сложившихся условиях (действительно, в практике могут возникать новые условия, которые ранее не были формализованы именно потому, что такого «оптимального» режима еще не было и про создающиеся условия еще никто не знал и, тем более, не формализовал). После установленных коррекций процедура повторяется и профессионалам предлагается совокупность допустимых

решений с наилучшими показателями оптимизируемого функционала. Внутри этого «договорного множества» достигается устраивающая ЛПП стратегия, которая и назначается решением.

Абсолютным достоинством этого подхода является тот факт, что достижимость предъявленного плана подтверждается всеми его исполнителями, а план действительно является более оптимальным, нежели план, который создается без такой процедуры.

При поиске компромисса по структуре ассортимента между лучшим решением и прогнозом продаж при сопоставимых объемах реализации готовой продукции чистая прибыль снижается. Но решение становится ближе к реалиям рынка.

Необходимость предъявления семейства квазиоптимальных планов приводит нас к идее использования для решения задачи оптимизации метода стохастического имитационного моделирования – метода Монте-Карло.

Без обозначения вновь реализованных элементов know how, которые оказались специфическими для имитации событий, определяемых технологическими особенностями производства, укажем на основные принципы нашего подхода.

Мы описали производственный процесс как набор производственных функционалов

$$F_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, F_v(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

которые определяют величины запросов сырья у соответствующих поставщиков, режимы работы подразделений, объемы выпускаемой продукции по ассортиментам, остатки на складах и т.д. В число этих функционалов входят и аналитические показатели (прибыль, рентабельность и т.д.)

Величины x_1, x_2, \dots, x_n – суть набор всех переменных производственной системы, которые определяют производственный процесс, причем $x_k \in [a_k; b_k]$. Определение границ этих сегментов является важнейшей задачей, при решении которой наибольшее значение имел анализ показателей производственного процесса, характеристик оборудования, склада, запросов менеджеров по продажам. Некорректность в определении этих границ, как будет продемонстрировано ниже, определит ничтожность предлагаемых методов решения.

На переменные x_1, x_2, \dots, x_n накладывались как линейные ограничения вида

$$a_{li_1}x_{i_1} + a_{li_2}x_{i_2} + \dots + a_{li_m}x_{i_m} \leq B_l,$$

так и логические, типа «если А, то В, иначе С».

Принцип имитации предполагает многократную симуляцию значений переменных x_1, x_2, \dots, x_n , $x_k \in [a_k; b_k]$ с помощью равномерного распределения. Во многих случаях генерируемые величины имеют характер дискретных значений (например, величины загрузки оборудования должны быть кратными некоторым технологическим значениям, количество голов прибывшего на переработку скота не должно быть не целым и т.д.). Выбор существенных «запасов» при определении границ приводит к существенному времени имитации, попытки искусственных ограничений этих границ приводит к часто возникающей в таких случаях ситуации «недопустимого решения». С другой стороны, некоторые величины, определяющие долевые показатели организации процесса могут быть связаны соотношением типа

$$x_{i_1} + x_{i_2} + \dots + x_{i_m} = N. \quad (*)$$

Тогда на начальном этапе генерируются вспомогательные величины $y_{i_k} \in [0; b_{i_k} - a_{i_k}]$.

Определяем

$$x_{i_k} = a_{i_k} + \left(N - \sum_{s=1}^m a_{i_s} \right) \frac{y_{i_k}}{\sum_{s=1}^m y_{i_s}}.$$

Так как появление различных линейных ограничений происходит в рамках модели автоматически (что достигается участием в модели управляющих переменных, которые включают операторы «если А, то В, иначе С»), то предусмотреть все возможные ограничения, определяющие сокращение диапазона границ ($\{a_k\}, \{b_k\}$) для избегания получения недопустимых сочетаний (x_1, x_2, \dots, x_n) не удастся. Поэтому после генерации точки $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R_n$, мы вынуждены проверять выполнение практически всех условий, накладываемых на сочетания (x_1, x_2, \dots, x_n) , за исключением, уже реализованных ограничений типа (*). Далее по указанным (x_1, x_2, \dots, x_n) , допущенными на предыдущем шаге, мы вычисляем необходимые производственные функционалы (функционалы,

характеризующие выполнение производственного плана). Результат фиксируется как доступный план, который на следующем этапе будет сравниваться с вновь рассчитанным.

Наличие «оврагов», реализованных в примере выше, которые появляются в рамках модели производственного процесса, указывает на необходимость модификации процесса уточнения экстремума.

Так, при реализации процесса генерации допустимых решений нами предлагалась следующая процедура. После достижения на некотором шаге решения, целевое значение F_0 которого некоторым существенным образом (например, на 2 %) превышает текущее значение F , полученное до этого, нами рекомендуется провести дополнительную серию испытаний, но при этом $x_k \in [x_k^0 - d(b_k - a_k); x_k^0 + d(b_k - a_k)]$. Здесь x_k^0 - значение параметра, при котором достигается $F_0 = F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, d - некоторая величина, которую рекомендуется выбрать равной 0,05, однако, на модельных задачах нами было показано, что чем больше ограничений, тем меньшее значение d приводило к локализации экстремума за меньшее время. При этом попытка заменить равномерное распределение на нормальное со средним в x_k^0 с различными значениями среднеквадратичного отклонения, к существенному ускорению процесса не приводило.

Таким образом, в основу симуляции были положены формализованные условия реального производственного процесса, процедуры установления границ для применения равномерного распределения. Это определило возможность реализации специальных различных схем генерации (например, указанную схему с нормировкой) и дало возможность избегать ситуации «недопустимого решения», которые часто возникают при решении практических задач типа задач линейного программирования.

Необходимо отметить, что построенная модель допускает модификацию целевой функции. Действительно, максимизация показателя чистой прибыли может приводить к нарушению баланса сырья. В процессе убоя появляется мясо на кости, которое при дальнейшей переработке в соответствии с нормативами делится по видам, по сортам и постности. Эти компоненты, в свою очередь, являются основой при составлении рецептов колбасных изделий, деликатесов и полуфабрикатов. Сверхнормативные излишки каких-либо компонентов крайне нежелательны. Это влечет заморозку финансов, дополнительное использование складских мощностей, порча при хранении и прочие потери. Некоторые величины требуют дополнительных источников информации, оценок, реализация которых на реальных предприятиях может и не производиться. В рассматриваемой модели большинство этих аспектов рассмотрены как ограничения. Однако, в случае, если ЛПП озабочены ростом запасов сырья на складах и увеличением складских издержек (прежде всего издержек, связанных с качеством ресурсов на складах), в модели допускается рассмотрение целевой функции

$$F_{\text{новая цель}} = F_{\text{показатель чистой прибыли}} - \sum_{\text{номенклатура ассортимента}} a_i SB_i$$

где SB_i - остатки на складах i -го наименования ассортимента, a_i - коэффициент существенности влияния остатков i -го наименования ассортимента на принятие решения о структуре ассортимента.

4 Результаты моделирования

Для проведения расчетов нами был разработан демонстрационный набор данных, описывающий схему производства условного мясоперерабатывающего предприятия, выпускающего 100 тонн колбасных изделий и 30 тонн полуфабрикатов в сутки. Суммарный объем реализации был выбран в качестве модельного для удобства масштабирования результатов моделирования на предприятия любого объема и соответствуют среднему по объему предприятию мясной промышленности.

Все экономические показатели данного модельного предприятия максимально приближены к реальным в условных ценах 2005 года. Все ценовые показатели в модельном наборе данных выражаются в российских рублях (RUR). При принятых ценах на реализацию готовой продукции такое предприятие имеет месячную выручку порядка 700 000 000 RUR, что примерно соответствует \$10 000 000.

Технологический цикл предприятия может включать в себя производство продукции из живого скота, закупаемого у поставщиков. Продукт проходит несколько циклов переработки, причем на каждой производственной операции есть возможность результаты передела продавать на рынок либо пускать в дальнейшую переработку. Также существует возможность закупать промежуточные виды сырья и материалов на каждой стадии производства.

Номенклатура готовой продукции состоит из 381 позиции, среди которых продукция колбасного и полуфабрикатного цехов, объединенная в 20 номенклатурных групп. Кроме готовой продукции в номенклатуре предприятия присутствует закупаемая продукция, сырье и материалы, в совокупности все ресурсы предприятия насчитывают 655 позиций, начиная от живого скота и заканчивая отходами производства по видам.

Количество учитываемых операций производства составляет 5347 элементарных операций, в том числе операции покупки, продажи и переработки. Каждая операция имеет входные и выходные ресурсы, причем совокупный объем ресурсов может меняться в процессе выполнения операции.

В рамках исследования предложенной имитационной модели нами был проведен ряд численных экспериментов по исследованию скорости роста максимальной найденной прибыли по оптимальной схеме производства в зависимости от количества генерируемых схем. Так как генерация и расчет имитационных схем - это наиболее затратный процесс по вычислительной сложности во всей методике, важно знать, какое количество схем является разумным компромиссом между задачей максимизации прибыли и временем, затраченным на генерацию.

Для этого было произведено более 40 000 симуляций. Оказалось, что прибыль распределяется почти нормальным образом с центром распределения, близким к прибыли базового решения (см. рисунок 2). Это совпадает с ожидаемым эффектом, который заключается в том, что примерно равное количество схем будет лучше и хуже базового решения

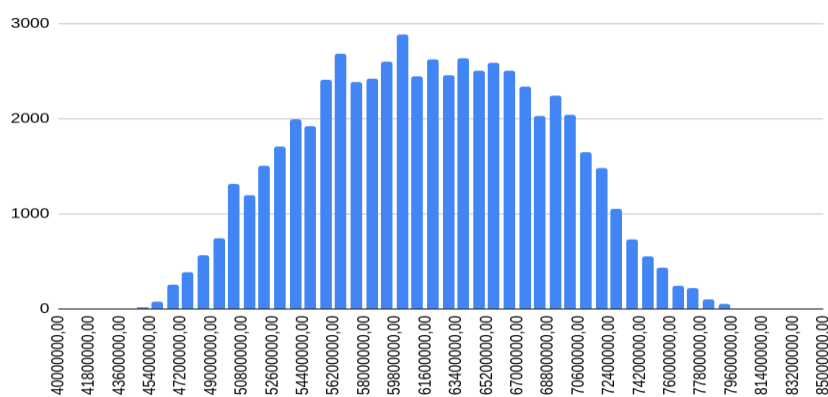


Рис. 2. Распределение прибыли имитационных решений

Прибыль базового решения составляет 64902234 RUR, что, строго говоря, лежит правее центроида распределения гистограммы выше. Это также обосновывается тем, что план продаж, на котором основывается базовое решение был составлен на основе рекомендаций экспертов предметной области, что положительно сказывается на его экономических характеристиках.

Далее нами было проанализировано то, как растет максимальная найденная прибыль при увеличении количества решений. Так как генерируемые схемы полностью независимы друг от друга нет необходимости для увеличения робастности запускать моделирование несколько раз и усреднять полученные результаты. Достаточно просто сэмплировать необходимое количество симуляций из одного достаточно большого прогона. Результаты такого анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экономические результаты в зависимости от количества симуляций

| Параметр | Абсолютное значение | В процентах от выручки | Прирост |
|---|---------------------|------------------------|---------|
| Выручка | 700 000 000,00 RUR | | |
| Прибыль базового решения | 64 902 234,00 RUR | 9,27% | |
| Максимальная прибыль после 1000 симуляций | 78 856 870,00 RUR | 11,27% | 1,99% |
| Максимальная прибыль после 5000 симуляций | 80 639 773,00 RUR | 11,52% | 2,25% |
| Выгода | 15 737 539,00 RUR | 1,24% | |

Как видно из таблицы, уже после первой тысячи симуляций максимальная найденная прибыль увеличилась более чем на 20%, что составляет очень существенный экономический эффект. Если рентабельность базового решения составила 9,27%, то наилучшее решение, найденное нашим алгоритмом достигает рентабельности 11,52% (после 5000 симуляций). Также можно увидеть, что разница между максимальной прибылью за 1000 решений и за 5000 совершенно незначительна, что свидетельствует о быстрой стабилизации имитационной модели. Таким образом, был сделан вывод о нецелесообразности генерации более чем 5000 схем. А для большинства практических приложений вполне достаточно ограничиться 1000 симуляций.

Для апробации модели расчеты проводились на компьютере под управлением процессора Intel Core i5-8265U CPU @ 1.60GHz, 24 гигабайт оперативной памяти. На этом аппаратном обеспечении генерация одной схемы производства занимала в среднем ровно 46 секунд. Таким образом генерация 1000 решений занимала около 13 часов. Необходимо заметить, что данная задача очень хорошо масштабируется и мы наблюдали практически линейную зависимость между временем генерации и мощностью центрального процессора.

Кроме того, в ходе апробации модели был исследован вопрос зависимости результативности модели от величины вариации объемов продуктового ассортимента. Как уже было сказано выше, мы принимали в качестве рабочей величины вариации 10%. То есть генерируемые значения лежали в пределах $\pm 10\%$ от объема плана продаж по каждой позиции ассортимента готовой продукции.

Необходимо заметить, что с учетом последующей нормализации эффективная вариация составляла ровно половину от номинальной величины, то есть после нормализации объемов они варьировались в пределах в среднем $\pm 5\%$ от первоначальной величины.

Однако для исследования устойчивости модели были протестированы значения, полученные при значениях вариации 10%, 20% и 40%. Было выдвинуто предположение, что при увеличении вариации алгоритм будет способен находить более эффективные схемы производства за счет большего пространства поиска. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.

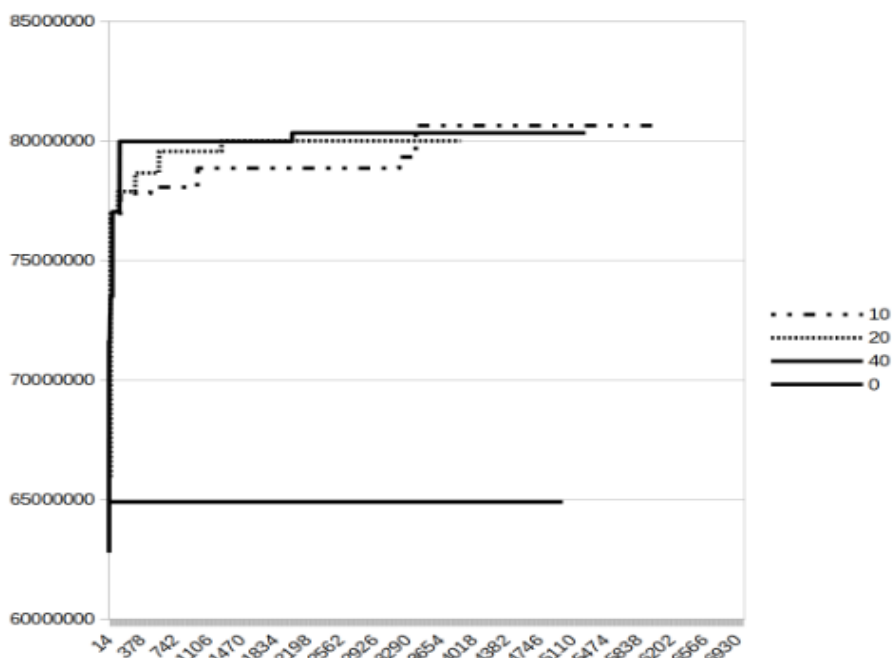


Рис. 3. Характер роста максимальной прибыли от размера вариативности объема производства.

Как видно из рисунка, выдвинутая гипотеза была полностью опровергнута. Максимальное значение прибыли очень слабо зависит от величины вариации. Мы можем объяснить это тем, что возможность находить более эффективные схемы производства полностью нивелируется редкостью этих “удачных” решений в гораздо более разреженном пространстве.

На практике это означает, что при применении предлагаемой методики в реальном производстве не обязательно использовать высокие значения показателя вариации. Рекомендуемого нами уровня 10% вполне достаточно для достижения оптимального уровня эффективности данной информационной системы.

Заключение

Автоматизация и ускорение процесса расчета и поиска оптимальных схем производства оказывает комплексный положительный эффект на организацию и результативность деятельности производственного предприятия. Такой эффект по нашим наблюдениям состоит из следующих аспектов:

- Нахождение более эффективного плана производства, нежели рассчитанный классическими методами.
- Сокращение издержек на ручной труд планового или финансового отдела предприятия.
- Повышение эффективности и скорости принятия решений на предприятии.
- Упорядочивание корпоративных баз данных для внедрения единого хранилища данных, служащего источником объективной истины на предприятии.

Прямой эффект от использования предлагаемой методики имитационного моделирования производства был проанализирован выше. По нашим оценкам, основанным на анализе результатов численных расчетов, в общем случае использование такой системы может дать эффект увеличения прибыли предприятия от 0,5 до 1,5 процентных пунктов относительно месячной выручки предприятия.

Наиболее значимым с точки зрения руководства предприятия может стать эффект от кардинальной смены парадигмы принятия решений в области планирования месячного бюджета производства. В результате консультаций со специалистами предметной области мы обнаружили, что удивительно большое число производственных предприятий используют упрощенные методики для планирования производственного процесса. В связи с этим расчет экономических показателей занимает несколько человеко-дней труда. Поэтому на практике применяется метод сценариев, когда в виде проекта бюджета полноценно рассчитываются два, реже три варианта схемы производства, которые затем анализируются и комбинируются.

Общая схема принятия бюджета на производственном предприятии состоит из следующих шагов, которые используются в опосредованном виде и в нашей системе:

- Сбор прогнозов по объему реализации готовой продукции с учётом ситуации на рынке. На этом этапе составляется прогноз продаж.
- Предварительный расчет по прогнозу продаж потребностей в основных и вспомогательных материалах.
- Согласование прогноза продаж со службами закупок и производства.
- Возможны корректировки цен закупок и реализации, загрузки оборудования и производственного персонала, затрат на энергетику, логистику и проч.
- Ручная корректировка проекта бюджета, его обоснование и утверждение.

На каждом из этих этапов при отсутствии одобрения хотя бы одного из участвующих в обосновании специалистов (отдел закупок, отдел продаж, технолог, менеджмент) происходит возврат проекта бюджета на доработку. В условиях классических расчетов неизбежно снижение качества планирования ввиду анализа меньшего количества расчётных вариантов.

Внедрение автоматизированной системы на основе имитационного моделирования существенно повышает эффективность планирования, оперативного анализа текущих параметров – экономических показателей, объёмов реализации и движение материальных ресурсов. На качественно новый уровень выводится математическое обоснование принятия лучших управленческих решений.

Разработанная система позволяет не только прогнозировать варианты бюджетов для обоснования лучших управленческих решений, но и в режиме on-line накопительно, например, посуточно анализировать параметры объёмов реализации, выручки, прибыли и т.д. в зависимости от конкретных объёмов продаж, цен и проч. и возможные причины отклонений от бюджета

Литература

1. *Fahimnia, B.; Farahani, R. Z.; Marian, R.; Luong, L.* (2013). A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.32, No. 1, 1-19, doi:10.1016/j.jmsy.2012.07.005
2. *de Sampaio, R. J. B.; Wollmann, R. R. G.; Vieira, P. F. G.* (2017). A flexible production planning for rolling-horizons, *International Journal of Production Economics*, Vol. 190, 31-36, doi:10.1016/j.ijpe.2017.01.003
3. *Bozek, P.; Nikitin, Y.; Bezak, P.; Fedorko, G.; Fabian, M.* (2015). Increasing the production system productivity using inertial navigation, *Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 3, 274-278
4. *Kongchuenjai, J.; Prombanpong, S.* (2017). An integer programming approach for process planning for mixed-

- model parts manufacturing on a CNC machining center, *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 12, No. 3, 274-284, doi:10.14743/apem2017.3.258
5. *Chou, Y.-C.; Hong, L.-H.* (2000). A methodology for product mix planning in semiconductor foundry manufacturing, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, 278-285, doi:10.1109/66.857936
 6. *Panda, A.; Jurko, J.; Pandova, I.* (2016). *Monitoring and Evaluation of Production Processes*, 1st edition, Springer International Publishing, Cham
 7. *Chung, S.-H.; Lee, A. H. I.; Pearn, W. L.* (2005). Product mix optimization for semiconductor manufacturing based on AHP and ANP analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 11-12, 1144-1156, doi:10.1007/s00170-003-1956-8
 8. *Tanhaei, F.; Nahavandi, N.* (2013). Algorithm for solving product mix problem in two-constraint resources environment, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 5-8, 1161-1167, doi:10.1007/s00170-012-4054-y
 9. *Aryanezhad, M. B.; Komijan, A. R.* (2004). An improved algorithm for optimizing product mix under the theory of constraints, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 20, 4221-4233, doi:10.1080/00207540410001695961
 10. *Amin Badri, S.; Ghazanfari, M.; Shahanaghi, K.* (2014). A multi-criteria decision-making approach to solve the product mix problem with interval parameters based on the theory of constraints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5-8, 1073-1080, doi:10.1007/s00170-013-5360-8
 11. *Escudero, L. F.; Kamesam, P. V.; King, A. J.; Wets, R. J.-B.* (1993). Production planning via scenario modelling, *Annals of Operations Research*, Vol. 43, No. 6, 309-335, doi:10.1007/BF02025089
 12. *Smith, J. S.* (2003). Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 22, No. 2, 157-171, doi:10.1016/S0278-6125(03)90013-6
 13. *Ponsignon, T.; Mönch, L.* (2014). Simulation-based performance assessment of master planning approaches in semiconductor manufacturing, *Omega*, Vol. 46, 21-35, doi:10.1016/j.omega. 2014.01.005
 14. *Straka, M.; Malindzakova, M.; Trebuna, P.; Rosova, A.; Pekarcikova, M.; Fill, M.* (2017). Application of EXTENDSIM for improvement of production logistics' efficiency, *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 16, No. 3, 422-434, doi:10.2507/IJSIMM16(3)5.384
 15. *Chen, Y. X.* (2016). Integrated optimization model for production planning and scheduling with logistics constraints, *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 15, No. 4, 711-720, doi:10.2507/IJSIMM15(4)CO16
 16. *Güçdemir, H.; Selim, H.* (2017). Customer centric production planning and control in job shops: A simulation optimization approach, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 43, Part 1, 100-116, doi:10.1016/j.jmsy.2017.02.004
 17. *Melouk, S. H.; Freeman, N. K.; Miller, D.; Dunning, M.* (2013). Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing, *International Journal of Production Economics*, Vol. 141, No. 1, 269-276, doi:10.1016/j.ijpe.2012.08.001
 19. *Ankenman, B. E.; Bekki, J. M.; Fowler, J.; Mackulak, G. T.; Nelson, B. L.; Yang, F.* (2011). Simulation in production planning: An overview with emphasis on recent developments in cycle time estimation, *Kempf, K.; Keskinocak, P.; Uzsoy, R. (Eds.), Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise*, 1st edition, Springer, Boston, 565-591, doi:10.1007/978-1-4419-6485-4_19
 20. *Vasant, P.; Barsoum, N.* (2010). Hybrid pattern search and simulated annealing for fuzzy production planning problems, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 60, No. 4, 1058-1067, doi:10.1016/j.camwa.2010.03.063
 21. *Nazari-Shirkouhi, S.; Eivazy, H.; Ghodsi, R.; Rezaie, K.; Atashpaz-Gargari, E.* (2010). Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the Imperialist Competitive Algorithm, *Expert Systems with Applications*,
 22. *Fedorko, G.; Rosova, A.; Molnar, V.* (2014). The application of computer simulation in solving traffic problems in the urban traffic management in Slovakia, *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, Vol. 9,
 23. *Saderova, J.; Kacmary, P.* (2013). The simulation model as a tool for the design of number of storage locations in production buffer store, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 18, No. 1, 33-3
 24. *Homem-De-Mello, T.; Bayraksan, G.* (2014). Monte Carlo sampling-based methods for stochastic optimization, *Surveys in Operations Research and Management Science*, Vol. 19, No. 1, 56-85, doi:10.1016/j.sorms.2014.05.001
 25. *Cai, T.; Wang, S.; Xu, Q.* (2015). Monte Carlo optimization for site selection of new chemical plants, *Journal of Environmental Management*, Vol. 163, 28-38, doi:10.1016/j.jenvman. 2015.08.002

26. *Janekova, J.; Kovac, J.; Onofrejova, D.* (2015). Application of modelling and simulation in the selection of production lines, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 816, 574-578, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.816.574
27. *Janekova, J. & Fabianova, Jana & Ľaríková, Gabriela & Onofrejova, Daniela & Kovac, J.* (2018). Product Mix Optimization Based on Monte Carlo Simulation: A Case Study. *International Journal of Simulation Modelling*. 17. 295-307. 10.2507/IJSIMM17(2)436.
28. *Minqi Li, Feng Yang, Reha Uzsoy, Jie Xu*, A metamodel-based Monte Carlo simulation approach for responsive production planning of manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 38, 2016, Pages 114-133, ISSN 0278-6125, doi:10.1016/j.jmsy.2015.11.004.
29. *Guoqing Cheng, Ling Li*, Joint optimization of production, quality control and maintenance for serial-parallel multistage production systems, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 204, 2020, 107146, ISSN 0951-8320, doi:10.1016/j.res.2020.107146.
30. *Faaland B, Mark MK, Thomas S.* A fixed rate production problem with Poisson demand and lost sales penalties. *Prod Oper Manag* 2019;28(3):516–34.
31. *Cheng GQ, Zhou BH, Li L.* Joint optimisation of production rate and preventive maintenance in machining systems. *Int J Prod Res* 2016;54(21):6378–94.
32. *Chernyakova I.S.* (2019) Primenenie metodov imitatsionnogo modelirovaniya v ramkakh pravleniya finansovoy ustoychivostyu predpriyatij myasopererabatyvayushey otrasli [Application of the methods of imitation modeling within the framework of the management of the financial stability of the enterprises of meat processing industry]. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo*. 9. (2). – 81-92. doi: 10.18334/epp.9.2.40904