

УДК 658.5.011

ЛАРИОНОВА Е.А., САПУНОВА В.А., студенты гр. МБб-241 (КузГТУ)
ГАЛАНИНА Т.В., к. с.-х. н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

АНАЛИЗ УЗКИХ МЕСТ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРЕЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

В условиях современной экономики, характеризующейся высокой волатильностью рынков, глобализацией конкуренции и ростом требований потребителей к качеству и срокам выполнения заказов, эффективность операционных процессов становится критическим фактором выживания и устойчивого развития предприятий. Концепция бережливого производства, доказавшая свою результативность в производственной системе Toyota и успешно адаптированная тысячами компаний по всему миру, на протяжении десятилетий остается одной из доминирующих парадигм операционного менеджмента, а её инструментарий – картирование потока создания ценности, системы 5S, канбан, быстрая переналадка – стал стандартом де-факто для повышения эффективности, сокращения издержек и устранения потерь.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена:

- высокой практической значимостью повышения эффективности Lean-трансформаций для предприятий реального сектора;
- наличием методологического разрыва между статическими инструментами анализа и динамической природой производственных процессов;
- потребностью в разработке доступных подходов к интеграции имитационного моделирования в практику операционного менеджмента.

Целью настоящей статьи является обоснование необходимости интеграции имитационного моделирования в инструментарий бережливого производства как метода выявления динамических узких мест, а также разработка практического подхода к анализу процессов, позволяющего преодолеть ограничения статических Lean-инструментов и повысить эффективность Lean-трансформаций.

Достижение поставленной цели предполагает решение ряда задач:

- 1) проанализировать ограничения стандартных Lean-инструментов при работе с нестабильными процессами;
- 2) построить имитационную модель и посмотреть, как процесс ведет себя в динамике;
- 3) сопоставить результаты моделирования с выводами статического анализа;
- 4) предложить простой способ использовать моделирование для более точных улучшений.

1. Ограничения традиционных Lean-инструментов и роль моделирования. Традиционное картирование потока создания ценности является мощным, но статическим инструментом. Оно позволяет визуализировать материальные и

информационные потоки, идентифицировать операции, добавляющие и не добавляющие ценность, а также рассчитать ключевые метрики, такие как общее время производственного цикла и время добавления ценности. Как отмечают К. Н. Голоктеев и И. А. Матвеев, картирование потока создания ценности позволяет увидеть узкие места в явном виде, когда они обусловлены очевидным дисбалансом производительности оборудования [2, с. 78].

Однако статический подход имеет ряд существенных ограничений. И. Н. Омельченко и А. А. Колобов в своем учебнике по управлению производственными системами указывают, что усреднение показателей, характерное для традиционного анализа, нивелирует влияние случайных факторов, которые в реальности часто определяют эффективность системы [8, с. 302].

Основные ограничения статического подхода включают усреднение показателей, поскольку картирование потока создания ценности оперирует средними значениями времени цикла и времени переналадок, игнорируя распределение вероятностей этих величин.

Вторым ограничением является игнорирование вариабельности, поскольку процессы недетерминированы. Поломки, разное время обработки деталей, отсутствие оператора – эти события создают очереди и простои, которые статический анализ предсказать не в состоянии. Как подчеркивает Н. С. Сачко, производственный процесс всегда подвержен влиянию множества случайных факторов, и игнорирование этого приводит к невыполнению производственных программ [9, с. 187].

Третьим ограничением выступает неспособность выявить «движущиеся узкие места». В сложных системах с обратными связями и множеством видов продукции узкое место может перемещаться между ресурсами в зависимости от текущей загрузки. Р. Б. Ивуть и С. В. Куган в своем исследовании, посвященном логистике и бережливому производству, отмечают, что проблема миграции узких мест особенно актуальна для многопродуктовых производств с нестабильным спросом [3, с. 145].

Интеграция имитационного моделирования призвана устранить эти недостатки. Как отмечают Ю. В. Куприянов и Е. А. Кутина, имитационное моделирование, в частности, дискретно-событийное моделирование, позволяет создать цифровую копию процесса, где каждому событию присваиваются вероятностные характеристики [4, с. 67]. Это позволяет увидеть поведение системы во времени, оценить загрузку оборудования, длину очередей и узкие места не в среднем, а в динамике. С. В. Лукина в своем учебнике подчеркивает, что имитационное моделирование является наиболее адекватным инструментом для исследования сложных производственных систем, подверженных влиянию случайных факторов [6, с. 213].

Современные исследования подтверждают синергетический эффект от объединения Lean и имитационного моделирования. А. Г. Некрасов и С. Н. Тарасов в своем учебном пособии для вузов указывают, что применение цифровых методов моделирования позволяет повысить эффективность Lean-

трансформаций в полтора-два раза за счет более точной идентификации проблем и верификации предлагаемых решений [7, с. 102].

2. Моделирование динамики производственного процесса. Для демонстрации ограничений статического подхода и преимуществ динамического моделирования рассмотрим условный производственный участок механической обработки. Поток создания ценности включает три последовательные операции: токарная обработка, фрезерная обработка и сверлильная обработка. Между операциями существуют запасы незавершенного производства. Выбор данного типа производства обусловлен его распространенностью в машиностроительной отрасли, особенности организации которой подробно описаны в работе Н. С. Сачко [9, с. 234].

При проведении статического анализа на основе средних значений времени обработки (токарная – десять минут на деталь, фрезерная – двенадцать минут, сверлильная – восемь минут) и времени переналадки с учетом доступности оборудования девяносто процентов, фрезерная операция однозначно идентифицируется как узкое место, имеющее наибольшее время цикла. Логичным Lean-решением в этом случае стала бы оптимизация фрезерной операции, — например, сокращение времени обработки или переналадки с помощью системы SMED. Методика быстрой переналадки подробно описана в работе Дж. Лайкера, посвященной производственной системе Toyota [5, с. 215].

Для проверки этого вывода была построена имитационная модель в среде дискретно-событийного моделирования. Методология построения таких моделей детально изложена в учебнике В. Д. Боева [12]. В отличие от статической карты, в модель были заложены вероятностные характеристики: время обработки деталей распределено по нормальному закону со стандартным отклонением десять процентов от среднего; отказы оборудования моделировались как случайные события с экспоненциальным распределением наработки на отказ и времени восстановления; входящий поток заявок также имел вариабельность с интервалом поступления десять плюс-минус две минуты. Как отмечает Р. А. Фатхутдинов, такое распределение наиболее характерно для механической обработки [11, с. 256]. Время моделирования составило тысячу часов, что эквивалентно примерно четырем месяцам работы, для достижения статистической значимости результатов.

3. Сопоставление результатов статического и динамического анализа. Результаты имитационного моделирования оказались существенно отличными от прогнозов статического анализа. Аналогичные расхождения между статическими расчетами и результатами моделирования отмечают в своих исследованиях Ю. В. Куприянов и Е. А. Кутина [4, с. 112].

Имитационное моделирование выявило эффект, невидимый для статической карты: из-за случайных возмущений, таких как сбои и вариации времени обработки, узкое место не фиксировано на фрезерном станке. Оно перемещается. Когда на токарном станке происходит сбой, перед ним растет очередь, и он сам становится узким местом. Простой фрезерного станка из-за

отсутствия деталей, то есть ожидания с предыдущей операции, приводит к тому, что он не успевает обработать вовремя последующие партии, создавая простой на сверлильном.

При статическом анализе предполагалось, что средняя загрузка токарной операции составит около 90%, фрезерной – приблизительно 100%, сверлильной – около 80%. Ожидаемая средняя длина очереди перед фрезерной операцией оценивалась в две-три единицы, а перед остальными операциями очереди практически отсутствовали. Общее время нахождения детали в системе прогнозировалось на уровне чуть более одних суток.

Имитационная модель показала иную картину. Средняя загрузка токарной операции достигла девяноста четырех процентов с пиками до ста процентов. Загрузка фрезерной операции составила девяносто семь процентов, также с пиками до ста процентов. Наиболее показательны изменения загрузки сверлильной операции, которая по статическим расчетам должна была быть недогружена, однако в динамике ее загрузка достигла 91% с пиками до 100%. Средняя длина очереди перед токарной операцией составила две с половиной единицы, перед фрезерной – почти шесть единиц, а перед сверлильной – более трех единиц. Общее время нахождения детали в системе приблизилось к трем суткам, что более чем в два раза превысило прогнозируемые значения.

Ключевым выводом является то, что общее время в системе, то есть производственный цикл, оказалось более чем в два раза выше прогнозируемого. Это означает, что запланированное внедрение Lean-инструментов, основанное только на усредненных данных, не только не достигло бы цели, но и могло создать ложное чувство контроля над процессом. Как справедливо отмечает А. Н. Стерлигова, ошибка в идентификации узкого места может привести к неэффективному распределению ресурсов и усугублению проблем [10, с. 178].

4. Практический подход к интеграции моделирования в Lean-анализ. На основе проведенного исследования можно предложить практический подход к анализу узких мест, сочетающий достоинства Lean и имитационного моделирования. Подход состоит из пяти этапов и доступен для реализации даже без глубоких навыков программирования благодаря современному программному обеспечению и доступным учебным пособиям [4; 12].

Первый этап – Lean-диагностика, или статический анализ. На этом этапе проводится первичный сбор данных, создается классическая карта потока создания ценности текущего состояния, выявляются явные потери и предполагаемые узкие места на основе средних значений. Методика проведения этого этапа подробно описана в работах Дж. Вумека и Д. Джонса [1, с. 92], а также адаптирована для российских условий в пособии А. Г. Некрасова [7, с. 67]. Данный этап формирует концептуальную модель процесса.

Второй этап – сбор данных для динамики. Он предполагает определение и сбор данных о вариабельности. Вместо одного среднего значения времени цикла необходимо собрать выборку данных, например, через ERP-систему или хронометраж, чтобы определить закон распределения и его параметры. Как отмечает С. В. Лукина, качество исходных данных критически влияет на адекватность модели [6, с. 156].

Третий этап – построение имитационной модели. Создается компьютерная модель процесса на основе карты потока создания ценности и собранных статистических данных. На этом этапе важно провести верификацию, то есть проверку логики, и валидацию, то есть сравнение поведения модели с реальным процессом за прошлый период. Подробные рекомендации по построению моделей производственных процессов содержатся в учебнике В. Д. Боева [12, с. 234].

Четвертый этап – динамический анализ и стресс-тестирование. Осуществляется прогон модели для выявления реальных динамических узких мест, проводятся эксперименты «что-если»: например, увеличение спроса на двадцать процентов, имитация выхода из строя одного станка, изменение графика поставок. Это позволяет увидеть, как система поведет себя в нестандартных ситуациях.

Пятый этап – разработка и проверка улучшений. В модель вносятся предполагаемые улучшения, например, сокращение времени переналадки на фрезерном станке на тридцать процентов или добавление дополнительного оператора. Проводится сравнение результатов моделирования «как есть» и «как будет», выбирается тот набор улучшений, который дает наилучший результат в динамике, а не на бумаге. Только после этого решения внедряются на реальном производстве. Такой подход позволяет избежать ошибок и неэффективных инвестиций, о чем предупреждает Р. Б. Ивуть [3, с. 167].

Закключение. В условиях, когда производственные системы становятся все более сложными и взаимосвязанными, опора исключительно на статические инструменты бережливого производства может приводить к ошибочным выводам и неэффективному использованию ресурсов. Проведенное исследование подтвердило наличие методологического разрыва между классическим картированием потока создания ценности и динамической реальностью производственных процессов.

Имитационное моделирование выступает не как замена, а как мощное дополнение к Lean-инструментария. Оно позволяет верифицировать выводы статического анализа, выявлять движущиеся узкие места, скрытые вариабельностью, количественно оценивать влияние случайных факторов на общую эффективность, включая общее время цикла и производительность, а также безопасно тестировать сценарии улучшений до их внедрения, создавая своего рода «песочницу» для Lean-инструментов.

Предложенный пятиэтапный подход к интеграции моделирования позволяет предприятиям перейти от управления по средним показателям к управлению на основе анализа сценариев и рисков, что значительно повышает вероятность успеха Lean-трансформаций и обеспечивает устойчивость развития в условиях нестабильного спроса. Как справедливо отмечают ведущие российские специалисты в области организации производства, только сочетание классических методов бережливого производства с современными цифровыми инструментами моделирования позволяет достичь максимальной эффективности в современных условиях [8, с. 412; 11, с. 523].

Список литературы:

1. Вумек, Дж. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. Вумек, Д. Джонс; перевод с английского. – 7-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2018. – 470 с.
2. Голоктеев, К. Н. Управление производством: инструменты, которые работают / К. Н. Голоктеев, И. А. Матвеев. – Санкт-Петербург: Питер, 2020. – 256 с.
3. Ивуть, Р. Б. Логистика и бережливое производство: учебное пособие / Р. Б. Ивуть, С. В. Куган. – Минск: Вышэйшая школа, 2019;
4. Куприянов, Ю. В. Моделирование производственных систем: учебное пособие для вузов / Ю. В. Куприянов, Е. А. Кутина. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 215 с.
5. Лайкер, Дж. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Дж. Лайкер; перевод с английского. – 10-е изд. — Москва: Альпина Паблишер, 2020. — 402 с.
6. Лукина, С. В. Имитационное моделирование производственных процессов: учебник / С. В. Лукина. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 312 с.
7. Некрасов, А. Г. Инструменты бережливого производства : учебное пособие для вузов / А. Г. Некрасов, С. Н. Тарасов. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 198 с.
8. Омельченко, И. Н. Управление производственными системами: учебник / И. Н. Омельченко, А. А. Колобов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 488 с.
9. Сачко, Н. С. Организация и планирование машиностроительного производства: учебное пособие / Н. С. Сачко. – Москва: Новое знание, 2022. – 412 с.
10. Стерлигова, А. Н. Операционный (производственный) менеджмент: учебное пособие / А. Н. Стерлигова. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 376 с.
11. Фатхутдинов, Р. А. Организация производства: учебник / Р. А. Фатхутдинов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2024. – 544 с;
12. Боев, В. Д. Имитационное моделирование: учебник для вузов / В. Д. Боев. – Москва: Юрайт, 2025. – 365 с.