

Сравнение подходов к анализу производственных систем с использованием карт потока создания ценности и инструментов цифрового моделирования

Comparison of approaches to the analysis of production systems using value stream maps and digital modeling tools

Статья написана на основании многочисленных вопросов, поступивших от представителей Заказчиков, о роли, особенностях и применении двух подходов при разработке проектов по повышению операционной эффективности предприятий машиностроения: метода карт потока создания ценности (одного из наиболее известных инструментов бережливого производства) и инструментов цифрового моделирования.

Ставилось целью показать, для чего и каким образом можно использовать имеющиеся карты потоков на предприятиях при построении цифровых моделей производств, а также как строить и использовать новые. На небольшом примере продемонстрированы особенности применения указанных подходов. Результатом является описание рекомендаций, разработанных и апробированных при решении практических задач в ходе выполнения проектов. Сделаны выводы о перспективах рассматриваемых инструментов.

Ключевые слова: карта потока создания ценности, бережливое производство, бережливая автоматизация, цифровое моделирование, имитационные модели, машиностроительные предприятия

The article is written on the basis of numerous questions received from Customer representatives about the role, features and application of two approaches in the development of projects to improve the operational efficiency of mechanical engineering enterprises: the value stream mapping method (one of the most well-known lean manufacturing tools) and digital modeling tools.

The goal was to show why and how existing stream maps at enterprises can be used when building digital production models, as well as how to build and use new ones. A small example demonstrates the features of using these approaches. The result is a description of recommendations developed and tested in solving practical problems during the implementation of projects. Conclusions are drawn about the prospects of the instruments under consideration.

Keywords: value stream map, lean production, lean automation, digital modeling, simulation, machine-building enterprise

**ЛИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Начальник Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: LisovAA@agat-roscosmos.ru

LISOV ALEXEY

Head of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**КАБАНОВ
АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

К.т.н., доцент, менеджер комплексных проектов отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

ORCID: 0000-0003-1989-0499

E-mail: KabanovAA@agat-roscosmos.ru

**KABANOV
ALEXANDER**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, complex project manager of Operational Efficiency Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**ПАНИНА ЮЛИЯ МИХАЙЛОВНА**

Специалист отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: PaninaYM@agat-roscosmos.ru

PANINA YULIA

Specialist of Operational Efficiency Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

**ГРАЧЕВ ЕВГЕНИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

Специалист отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: GrachevEV@agat-roscosmos.ru

GRACHEV EVGENY

Specialist of Operational Efficiency Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

Для цитирования: Лисов А.А. Сравнение подходов к анализу производственных систем с использованием карт потока создания ценности и инструментов цифрового моделирования / А.А. Лисов, А.А. Кабанов, Ю.М. Панина, Е.В. Грачев // «Экономика космоса». 2024. № 8. С. 42-57. DOI 10.48612/agat/space_economics/2024.03.08.05

Введение

Бережливое производство и связанные с ним методы получили широкое распространение в промышленности с начала 1990-х годов [1]. Эта концепция, направленная на устранение всех видов потерь на производстве, во многом стала одной из лучших практик, используемых при управлении операционной эффективностью. На отечественных предприятиях машиностроения инструменты бережливого производства, среди которых стан-

дартизация работы, 5S (организация рабочего пространства), картирование потока создания ценности, SMED (быстрая переналадка), канбан и др., начали активно внедряться где-то с середины 2000-х годов. На текущий момент масштаб их распространения и использования неоднородный: от небольших так называемых lean-подразделений на производствах отдельных предприятий до уровня, где это поставлено на системной основе в рамках объединений или корпораций. Яркий пример –

известная Производственная Система Госкорпорации «Росатом» (ПСР)¹. Существует и серия отечественных стандартов, посвященных бережливому производству² и картам потока создания ценности³, в частности.

Во второй половине «нулевых» стали появляться примеры использования относительно нового инструментария по анализу эффективности производственных систем с помощью цифровых моделей на базе технологии имитационного моделирования потоков на производстве [2-4]. Хотя математический аппарат и языки моделирования, лежащие в их основе, были известны задолго до этого (в основном, на основе дискретного моделирования событий, к примеру GPSS), появление средств визуального построения моделей систем типа Arena или Anylogic, проникновение на отечественный рынок зарубежных профессиональных средств моделирования производств типа Plant Simulation или DELMIA, увеличение характеристик и возможностей персональных ЭВМ сделали эти технологии доступными для прикладного применения на предприятиях, а не только в академических исследованиях. Существенным их преимуществом стала возможность комплексного воспроизведения потоков всей номенклатуры продукции в рамках одной модели без необходимости разработки аналитических процедур их расчета. Однако барьер по широкому их внедрению не преодолен до сих пор.

Рассмотрение темы, выведенной в заголовок статьи, неизбежно требует расширения и упоминания в этом контексте термина бережливая автоматизация (с англ. lean automation), который в настоящее время трактуется как синергия бережливого производства (с англ. lean production) и Индустрии 4.0 (с англ. Industry 4.0) [5]. Суть синергии состоит в использовании уже зарекомендовавших себя стратегий управления операционной эффективностью и современных возможностей средств автоматизации, прежде всего, интеграционного характера, а также обработки больших массивов данных. В работе, опубликованной в профильном журнале International Journal of Lean Six Sigma, опирающейся на анализ научных статей за последние несколько лет, показано, что взаимопроникновение обеих методологий находится в начальном состоянии: существенно большее число публикаций по этой теме – в последние 2-3 года [6]. Поэтому, не вдаваясь в эту

обширную область, ограничимся сравнительным рассмотрением двух подходов: с использованием карт потока создания ценности и цифрового моделирования потоков соответственно, т.к. они имеют наибольшее прикладное значение, по крайней мере, в сложившейся практике отечественных предприятий.

Представленные подходы в нашей стране применялись в проектах по улучшению производств относительно независимо. В большей степени это зависело от профиля компетенций компании-подрядчика, оказывающей услуги по сопровождению проекта. Отправной точкой компаний, традиционно консультирующих в области инструментов бережливого производства, была методология. Компании, предоставляющие услуги по разработке имитационных моделей, как правило, были ИТ-компаниями и отталкивались от функциональности распространяемого программного обеспечения.

Интересно то, что отечественная практика подтверждает международный опыт: развитие и внедрение методов бережливого производства выполняется достаточно обособленно от систем промышленной автоматизации, несмотря на то что в 2000-х уже активно обсуждались проблемы рационального сочетания методов lean с алгоритмами систем управления производством⁴. Отчасти это связано с тем, что традиционные промышленные системы автоматизации были направлены на поддержку деятельности текущего производства и не содержали функциональности по разработке проектного целевого состояния. Во многом этим обусловлена неоднозначность в понимании и использовании приведенных методов на предприятиях.

По существу, оба метода представляют собой способ информационного представления производственного потока, основными составляющими которого согласно М. Ротеру и Дж. Шуку [7] являются потоки материалов/полуфабрикатов/продукции и информации в производственной системе. Однако каждый из методов представляет различные возможности в части анализа производственных систем. Каковы эти возможности, какова методика использования инструментов и их совместного применения для получения больших результатов – об этом далее в настоящей статье.

¹ Производственная система «Росатом» (ПСР) [Электронный ресурс]. [2024]. URL: <http://platformaps.ru/> (дата обращения: 22.04.2024).

² ГОСТ Р 56407-2015. Бережливое производство. Основные методы и инструменты: дата введения 2015-05-27. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 15 с.

³ ГОСТ Р 57524-2017. Бережливое производство. Поток создания ценности: дата введения 2017-06-30. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 18 с.

⁴ «Бережливая автоматизация. Сочетание инструментов бережливого производства с правильными системами автоматизации может повысить производительность» [Электронный ресурс] // SME Media: [сайт]. [2024]. URL: <https://www.sme.org/lean-automation> (дата обращения: 22.04.2024).

Обзор методов. Картирование потока создания ценности

Определение. Согласно нормативной документации картирование потока создания ценности – метод, направленный на создание визуального образа информационных и материальных потоков, необходимых для выполнения заказа потребителя⁵.

Цель. В отличие от технологических планировок производственных подразделений, на которых представлены элементы производственной системы в статическом состоянии и которые можно видеть явно (оборудование, персонал, продукция), потоки скрыты от непосредственного наблюдения производственного процесса. Поэтому построение карты потока создания ценности (далее – КПСЦ) осуществляется с целью получения визуальной модели, на основе которой выполняется дальнейшее планирование и управление созданием ценности.

Содержание метода. В ставшем уже классическим источнике от М. Ротера и Дж. Шука, заслуживающим, по мнению авторов, безусловного внимания при инициации работ по картированию, приведено достаточно краткое, но исчерпывающее описание порядка применения данного метода на производстве [7].

Фактическое картирование выполняется в четыре этапа:

1. Подготовка. Перед началом картирования потока создания ценности важно идентифицировать тип продукции или семейство продукции.
2. Эскизирование или отрисовка текущего состояния потока создания ценности. Это делается путем последовательного, согласно технологии изготовления, прохождения пути перемещения продукции и сбора данных о том, каким образом продукт проходит основные этапы производства. Для обозначения процессов используются блоки. Процесс определяется как одна область потока материала/полуфабриката/продукции. Информационные потоки, такие как планирование заказов и контроль производства, также отображаются на карте. Для каждого процесса собираются данные: длительность процесса и структура декомпозиции общего времени процесса (время выполнения непосредственно операции, время на подготовку, время на наладку оборудования); количество операторов; данные по браку и др. В качестве оцениваемой метрики выступают: время выполнения заказа, время создания

ценности, непроизводительное время, потери.

3. Составление карты будущего состояния на основе проведенного анализа карт потоков с текущими параметрами.
4. План работы и реализация. Например, план может состоять из ежегодно обновляемого документа, в котором указывается, когда и где начинать улучшения, а также обязанности исполнителей.

Инструменты реализации. Построение карт выполняются на бумаге или в электронной форме в специальной, присущей для этого метода нотации с нанесением размерных характеристик визуализируемого потока. Автоматизация создания КПСЦ сегодня реализуется с использованием широкого класса программных систем, начиная от использования графических систем, в том числе инженерных CAD-систем для отрисовки карт, и заканчивая средствами моделирования бизнес-процессов, предоставляющих возможность расчета метрик потока. Наиболее близким по сути и по нотациям представления потоков инструментом автоматизации построения КПСЦ является программный продукт, который так и называется eVSM (electronic value stream map)⁶.

Программное обеспечение eVSM – это дополнительная программная надстройка к редактору Microsoft Visio в виде набора макросов. Программа eVSM предназначена для визуализации и анализа потоков создания ценности. В нее входят стандартные элементы для создания карт потока, которые позволяют специалистам по производству строить карты потока и далее производить расчеты показателей потока. eVSM также предоставляет функциональные возможности для интеграции карт Visio и электронных таблиц Excel.

Обзор методов. Цифровое имитационное моделирование потоков

Определение. Метод имитационного моделирования – экспериментальный метод, в рамках которого результаты формируются на основе выполнения экспериментов с компьютерной имитационной моделью, в рассматриваемом случае производственной системы [8]. При этом модель структурно подобна анализируемой системе и представляет собой логико-алгоритмическое описание поведения отдельных элементов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность событий, возникающих в моделируемой системе [9]. Цифровое моделирование здесь употребляется

⁵ ГОСТ Р 57524-2017. Бережливое производство. Поток создания ценности: дата введения 2017-06-30. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 18 с.

⁶ eVSM Mix – Digital Value Stream Mapping Software [Электронный ресурс]. [2024]. URL: <https://www.evsm.com/> (дата обращения: 02.05.2024).

в трактовке стандарта «Умное производство. Цифровые двойники» как присвоение информации элементу физического мира для его распознавания компьютером⁷. Эта модель далее может использоваться при построении цифрового двойника производства при условии обеспечения ее потоком актуализированных данных. В отличие от КПСЦ визуализация в этом методе является побочным результатом представления системы.

Цель. Оценку производственной системы и целенаправленное ее изменение выполняют с помощью имитационной модели тогда, когда сделать это другими методами затруднительно, что особенно актуально для сложных многономенклатурных производств. Ценностью является не столько получение значений показателей работы производственной системы, сколько понимание ее поведения при изменении факторов производства.

Содержание метода. В силу перечисленных особенностей метод содержит два основных этапа: построение модели и ее исследование. К ним добавляются: подготовительный этап сбора, анализа, подготовки данных для моделирования, а также этап обработки результатов моделирования и их интерпретация, на базе которых формируются предложения по улучшению системы. Здесь также предусмотрено построение моделей текущего и будущего (целевого) состояний.

Инструменты реализации. Модель производственной системы и потоки в ней могут быть воспроизведены программными средствами имитационного моделирования как универсального (независимо от предметной области: медицина, сельское хозяйство, ритейл и т.д.), так и специализированного (производство) назначения.

Следует отметить, что в большинстве систем имитационного моделирования независимо от их назначения внедрены элементы анализа потока создания ценности: например, по умолчанию уже встроена классификация операций на добавляющие ценность (с англ. value-added) и не добавляющие ценность (с англ. non value-added), генерируется статистика в указанных разрезах (см., например, система моделирования бизнес-процессов Arena Simulation Software⁸, система имитационного моделирования производств Tecnomatix Plant Simulation⁹ и др.).

В области дискретного производства (производства,

при котором процесс изготовления продукции имеет дискретный характер, т.е. прерывный по времени) в АО «Организация «Агат» используется специальное программное обеспечение собственной разработки – Система Динамического Моделирования (СДМ)¹⁰, особенностью которой является сочетание аналитических и имитационных методов анализа производственных систем [10]. Модель производства строится автоматически на основе исходных данных и визуализируется в трехмерном пространстве в статическом и динамическом состояниях, что позволяет отслеживать и анализировать материальные потоки в ускоренном режиме на пространственной планировке.

Демонстрационный пример

Приведем абстрактный демонстрационный пример из области аэрокосмического производства, на котором покажем особенности применения рассматриваемых подходов к анализу производственных систем в сравнении.

Описание примера. Рассмотрим производство крепежных элементов для авиационной техники. Изделие Кронштейн используется при монтаже электрической проводки. Он состоит из двух гнутых уголков с отверстиями под потайную головку и профиль (рис. 1). Сборка деталей изделия осуществляется на потайные заклепки.

Изделие имеет следующий маршрутный технологический процесс: размотка и обрезка алюминиевого листа → разметка развертки → ручная обрезка заготовки → гибка → сверление отверстий → нанесение анодного покрытия → покраска, сушка → сборка с другими деталями, входящими в изделие.

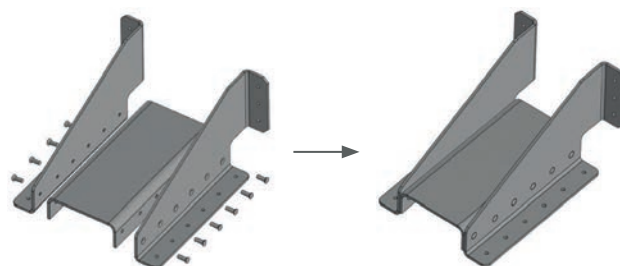


Рис. 1. Изделие Кронштейн в разборном и собранном состояниях.

Источник: собирательный образ типовой конструкции, разработано авторами на основании собственных исследований

⁷ ПНСТ 429-2020 «Умное производство. Цифровые двойники Часть 1. Общие положения». – Москва: Стандартинформ. – 25 с.

⁸ Arena Simulation Software [Электронный ресурс] // Rockwell Automation: [сайт]. [2024]. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html> (дата обращения: 22.04.2024).

⁹ TECNOMATIX Plant Simulation [Электронный ресурс] // Siemens: [сайт]. [2024]. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/plant-simulation-software/> (дата обращения: 22.04.2024).

¹⁰ Система динамического моделирования производственно-логистических процессов предприятия (СДМ) (Российская Федерация, свидетельство на программу для ЭВМ №2020664561): опубл. 13.11.2020 / М. Ю. Мохов, И. А. Ильин, А. А. Кабанов, В. С. Жамкова. – Москва: ФИПС. – Бюл. № 11. – Текст: непосредственный.

Заготовительная операция выполняется в течение 30 мин. Время наладки листогибочного станка перед операцией составляет 5 мин.

Гальваническая операция. Максимальная вместимость ванны – 12 шт., процесс обработки группы деталей занимает 30 мин. Один раз в месяц гальванический цех находится на техобслуживании в течение 4 часов.

Покрасочная операция. Покрытие наносится вручную с помощью пульверизатора, после чего детали направляются в сушильную камеру. Время окрашивания и сушки одной детали составляет 10 мин. для уголков и 20 мин. для профиля.

Сборочная операция. Последний этап проводится за верстаком, детали между собой скрепляются с помощью 12 заклепок с нанесением герметика. Сборка кронштейна занимает 45 мин.

Производство работает по графику 5/2. По производственной программе необходимо за один год изготовить 3000 изделий с равномерным распределением объема (250 шт.) по месяцам.

Построение карты КПСЦ

Текущая схема производственного потока визуализирована путем построения связей между блоками процессов. Карта потока текущего состояния изображена на рис. 2, схематично широкими красными стрелками показаны потоки детали «Профиль» и детали «Уголок», поток сборной детали «Кронштейн» представлен одним блоком «Сборка». В каждом блоке процесса (например, на рис. 2 цифрой 1 обозначен блок «Заготовительная операция») приводится информация о наименовании операции, количестве требуемых операторов, времени операционного цикла, количестве одновременно обрабатываемых заготовок/полуфабрикатов; общее доступное время и процент времени безотказной работы. Время цикла рассчитывается в минутах/секундах с учетом количества одновременно обрабатываемых изделий в партии (см. поле Qty Per Cycle). Доступное время определяется исходя из заданной сменности работ, в данном случае 8 часов (длительность рабочей смены), на карте отмечено цифрой 3 (рис. 2).

Серые связи (стрелки) определяют порядок материального потока, красные – информационного потока. Параметры с темным цветом шрифта являются входными данными, синие – расчетные.

Отрисовка карты текущего состояния начинается с отображения блока Заказчика и его потребностей. Для

рассматриваемого примера: ежемесячная потребность – 250 шт. товара, в пересчете в ежедневную потребность – 11 шт. Поступивший от Заказчика запрос продукции обрабатывается в системе управления предприятием, далее поступает в производственный отдел и отдел закупок для приобретения необходимого количества материалов, в данном случае, листового алюминия. Для производства одного кронштейна необходим один профиль и два уголка. Все детали изготавливаются из одного и того же листа. Учитывая стандартные размеры листа 1,5 м х 4,5 м, на одном листе могут быть размещены заготовки на 50 профилей и 100 уголков. Следовательно, для производства 250 кронштейнов в месяц понадобятся 5 листов.

Результаты анализа карты потока создания ценности

Выходные результаты выводятся на карте в отдельном блоке (см. обозначение цифрой 4, рис. 2). Общее время изготовления месячного объема (250 шт.) составило 31,11 дня, что несколько больше 1 мес., т.е. не позволяет обеспечить ежемесячную потребность Заказчика. При этом, согласно расчетам, время добавления ценности 165 мин. (т.е. суммарное время физико-химических процессов преобразования заготовок и полуфабрикатов в готовую продукцию, см. блок 4) составляет всего 1,1% от общей длительности цикла производства. Местом ограниченной пропускной способности (в устоявшейся терминологии бережливого производства – «узким местом» или «bottleneck» в англоязычном варианте) производства является сборка с временем цикла 45 мин./изделие, как наиболее трудоемкая и длинноточная операция.

Таким образом, по результатам построения карты потока текущего состояния в eVSM визуализирована схема процесса изготовления изделия Кронштейн в нотациях VSM и рассчитаны основные показатели эффективности процесса.

Далее, с использованием этих данных продемонстрируем порядок построения цифровой модели производства изделия «Кронштейн» и дополнительные возможности по анализу, которая она предоставляет.

Построение цифровой имитационной модели производственной системы для моделирования и анализа материальных потоков

Карта текущего состояния была использована для построения имитационной модели в автоматизированном режиме посредством eVSM¹¹. Данные карты из редактора MS Visio были экспортированы в MS Excel и далее импортированы в систему СДМ. В СДМ в авто-

¹¹ eVSM Mix – Digital Value Stream Mapping Software [Электронный ресурс]. [2024]. URL: <https://www.evsm.com/> (дата обращения: 02.05.2024).

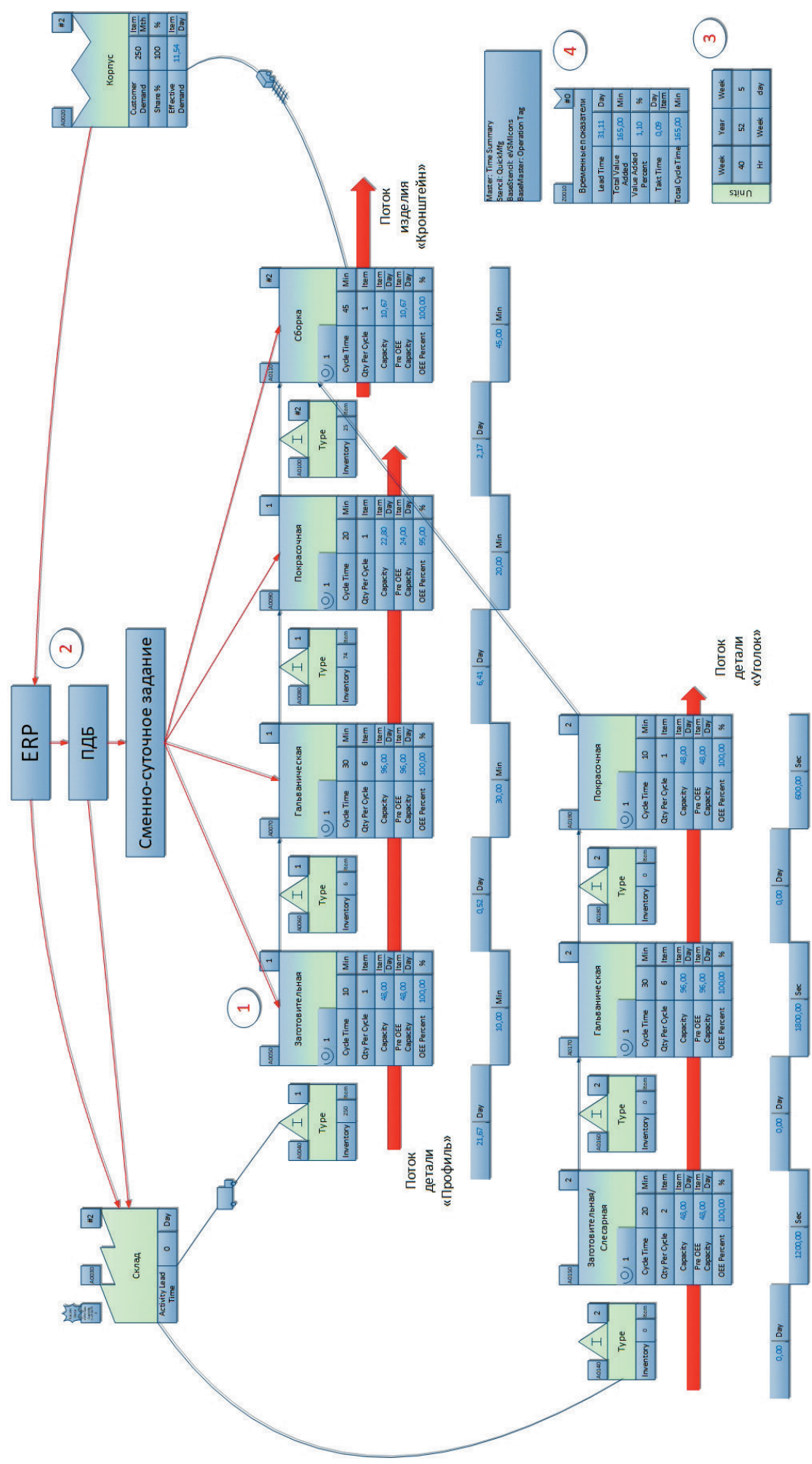


Рис. 2. КПСЦ изделия Кронштейн. Цифрами обозначены: 1 – блок процесса диаграммы; 2 – системы управления, обрабатывающие информационные потоки; 3 – блок, определяющий график работ производства; 4 – блок результатов расчета анализируемого потока. Источники: разработано авторами на основании собственных исследований

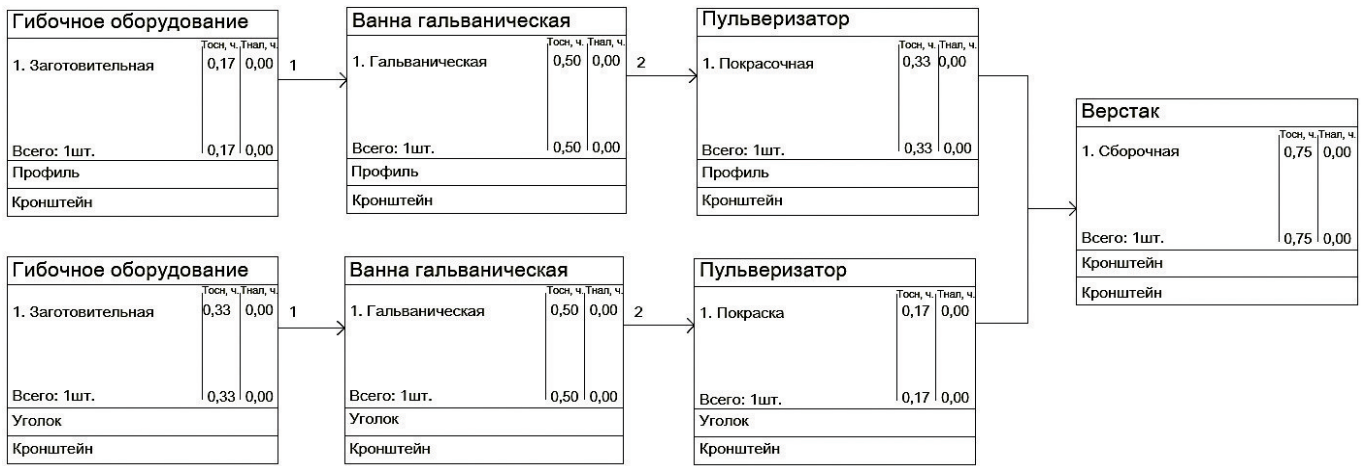


Рис. 3. PERT-диаграммы потока изделия Кронштейн в системе моделирования. В двух нижних строках каждого блока указаны: составной компонент изделия, для которого отображен процесс с данными по операции, и узел/изделие, в который этот компонент входит. Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

матическом режиме были воспроизведены потоки в виде PERT-диаграмм (рис. 3) и визуализированы в 3D на плане цеха, в том числе в динамическом режиме (рис. 4).

Теперь, в сравнении со схемой, полученной ранее в eVSM, поток в модели получил отображение в виде производственной линии (рис. 4) в составе гибочного оборудования (гибочный станок), гальванического участка (гальваническая ванна), покрасочного участка (покрасочная камера) и сборочного цеха (слесарный стол), что является упрощением, выполненным в целях сравнительного анализа модели и КПСЦ.

В действительности производственная система сложнее: оборудование сгруппировано по технологическому принципу, в цехе изготавливается и другая номенклатура помимо изделия Кронштейн. Более приближенный к реальному производству вариант приведен на рис. 5.

Для модели разработан сценарий, в котором установлен период моделирования, равный одному месяцу, а также задана производственная программа деталей изделия «Кронштейн» в количестве 250 шт.

Для соответствия КПСЦ и модели приняты следующие основные допущения:

- перемещение деталей между оборудованием осуществляется мгновенно, транспортные операции не задавались;
- после обработки детали перемещаются в выходной накопитель, где складываются в ожидании свободного рабочего места, следующего по потоку. По количеству деталей в накопителе перед обработкой на следующем рабочем месте визуально можно определить «узкие места» в процессе;

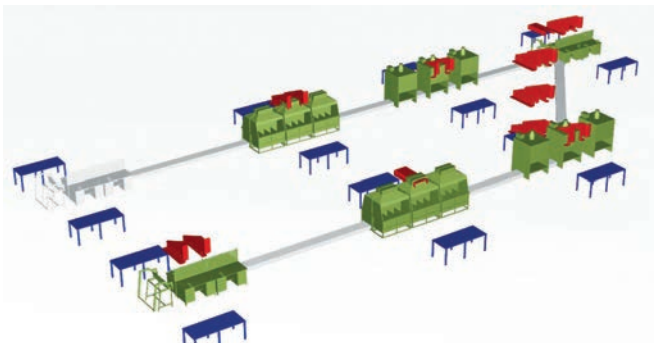


Рис. 4. Визуализация потоков изделия Кронштейн в системе моделирования. Показаны пути/потоки изделий. Снимок состояния производства, сделанный в процессе выполнения эксперимента (прогона модели). Источник: разработано авторами на основании собственных исследований



Рис. 5. Фрагмент механосборочного производства в системе моделирования. Красным цветом выделено оборудование, задействованное в изготовлении изделия «Кронштейн». Также красным цветом выделены пути/потоки изделий «Кронштейн». Снимок состояния производства, сделанный в процессе выполнения эксперимента (прогона модели). Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

- каждой детали доступно любое свободное оборудование соответствующего типа для выполнения операции, т.е. привязки номенклатуры к конкретному оборудованию не осуществлялись;
- не учитываются внеплановые сбои на производстве: отказы оборудования, невыход рабочих и т.д.;
- время выполнения операции задано фиксированной величиной, не диапазоном;
- компоненты изделия «Кронштейн»: уголки и профили производятся одновременно из одного листа металла. Далее процесс их обработки идет параллельно до момента сборки.

Результаты моделирования потоков в производственной системе

Результаты планирования потоков в производственной системе представлены на рис. 6.1 и 6.2. Из рисунка видно, что цикл производства в 31 день аналогичен полученному ранее в КПСЦ. Для выполнения программы в 250 изделий в месяц так же не хватает около 2 дней. Также в сравнении с КПСЦ цикл производства представлен не одним значением 165 мин., а варьируется от 130 мин. (0,09 дн.) до 31,15 дн. Таким образом, несмотря на то что процесс производства одинаковый для всех экземпляров изделий с одинаковым временем выполнения операций, несбалансированность работ линии и вынужденные ожидания в системе приводят к разбалансировке производственной линии в целом и, как следствие, разным величинам длительностей производственных циклов изготовления.

Помимо представленных ранее визуализаций потоков в производственной системе на плане и в 3D окруже-

нии цеха, также указывающих на рабочее место с ограниченной пропускной способностью («узкое место») в производственной системе (см. объемы незавершенного производства в виде скопления деталей перед сборкой), доступны для анализа: «процессно-продуктовая» диаграмма Ганта (рис. 7), диаграмма загрузки производственных ресурсов (оборудования) (рис. 8), циклограмма загрузки оборудования (рис. 9).

Из диаграммы (рис. 7) видно, что поскольку для сборки изделия «Кронштейн» используется одно рабочее место (верстак), то процесс сборки профиля и уголков идет последовательно (зеленые линии сетевого графика). Таким образом, в отличие от КПСЦ модель позволяет работать с каждым экземпляром потока изделий. Тогда как в КПСЦ принимается допущение, что поток одинаков для всех экземпляров. Это допустимо для анализа линейных потоков, но не пригодно для использования при анализе потоков, накладывающихся друг на друга: в рассматриваемом примере на операции сборки сходятся два потока: деталей «уголок» и деталей «профиль».

Частично снять это ограничение метода КПСЦ позволяет усовершенствованная версия программного обеспечения eVSM для применения в области производств Plant VSM Applications Mix Manufacturing VSM, распространяющаяся как коммерческий программный продукт¹². Эта версия позволяет работать со сборочными производствами (связывать несколько потоков на одной карте). Также из расширенных функциональных возможностей ПО доступны диаграмма Ганта и расчеты по методу критического пути. С этим можно работать на начальных этапах анализа эффективности организации

Показатель	Значение
Запланировано	100,00%
Начало производства	28.05.2024 10:10
Окончание производства	28.06.2024 16:00
Общая длительность производства, дней	31,24
Средняя загрузка ПЦ, %	64%
Средняя доля времени переналадок	0%
Общее кол-во выполненных операций	5 500
Средняя продолжительность серии, кол-во операций	3,49
Длительность планирования, сек.	6,26

Рис. 6.1. Результаты планирования потоков в производственной системе. Общие сводные показатели планирования. Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

¹² Plant VSM Applications [Электронный ресурс] // eVSM: [сайт]. [2024]. URL: <https://www.evsm.com/plant-vsm-applications> (дата обращения: 07.05.2024).

ИД про...	Изделие	Плановая дат...	Длина критического пути, дней	Дата начала производства
PPI-1_1	Кронштейн	30.06.2024	0,09	28.06.2024
PPI-1_2	Кронштейн	30.06.2024	0,10	28.06.2024
PPI-1_3	Кронштейн	30.06.2024	0,11	28.06.2024
PPI-1_4	Кронштейн	30.06.2024	31,15	28.05.2024
PPI-1_5	Кронштейн	30.06.2024	0,09	28.06.2024
PPI-1_6	Кронштейн	30.06.2024	0,11	28.06.2024
PPI-1_7	Кронштейн	30.06.2024	0,84	27.06.2024
PPI-1_8	Кронштейн	30.06.2024	0,10	28.06.2024
PPI-1_9	Кронштейн	30.06.2024	0,76	27.06.2024
PPI-1_10	Кронштейн	30.06.2024	0,87	27.06.2024

Рис. 6.2. Результаты планирования потоков в производственной системе.
Таблица «Анализ критических путей», содержащая данные по длительностям циклов изготовления экземпляров изделия «Кронштейн».

Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

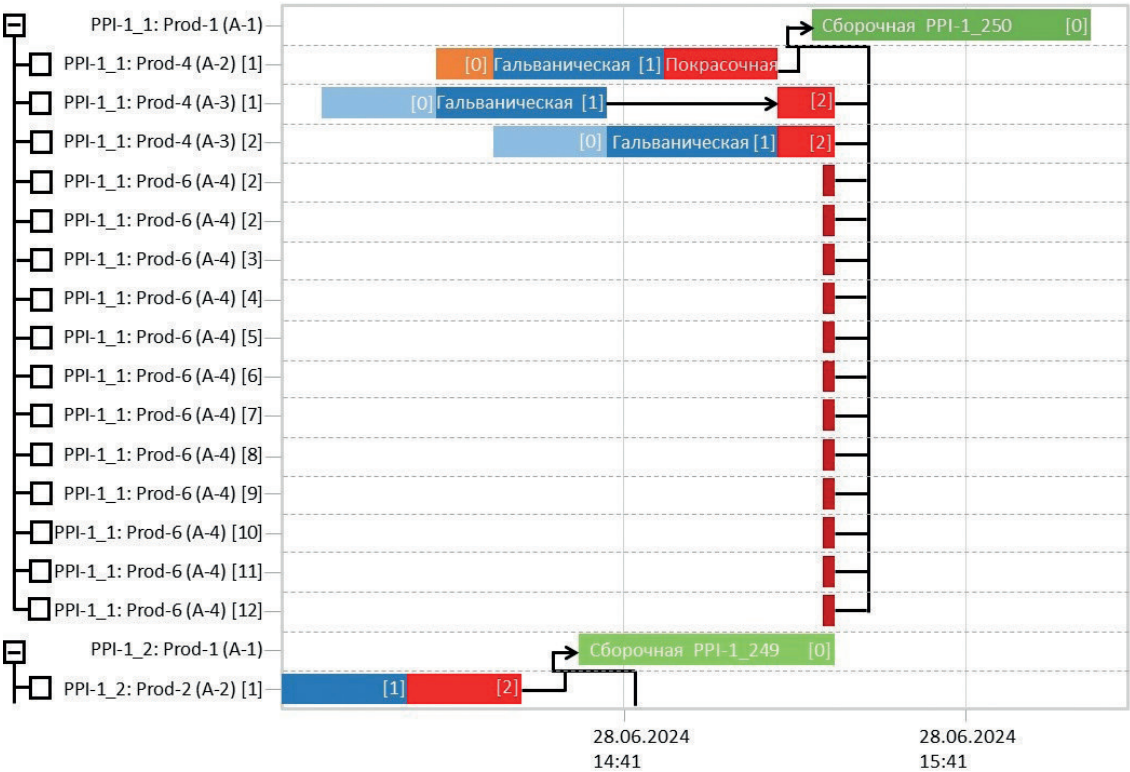


Рис. 7. Производственное расписание изготовления изделия Кронштейн в виде диаграммы Ганта. Показаны процессы изготовления составных компонентов (профиль – 1 шт., уголок – 2 шт., заклепки – 12 шт.) и связи между ними.

Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

потоков, принимая во внимание очередное допущение: потоки сборочных компонентов и самих сборок не пересекаются, т.е. не имеют совместно используемых рабочих мест и ресурсов производства.

Еще одним преимуществом модельного имитационного анализа является возможность отслеживания состояния производственных ресурсов (оборудование, персонал, технологическая оснастка и др.) в каждый момент времени. На рис. 8 показаны показатели

и циклограммы загрузки оборудования рассматриваемого демонстрационного примера.

Среди ресурсов с пиковой нагрузкой: верстак для сборки и гальванические ванны, однако пропускная способность ванн выше, так как выполняется групповое нанесение покрытия сразу для 6 деталей. Визуально это можно наблюдать в укрупненном масштабе т.н. «ресурсного» Ганта, приведенного на рис. 9.

Места с ограниченной пропускной способностью

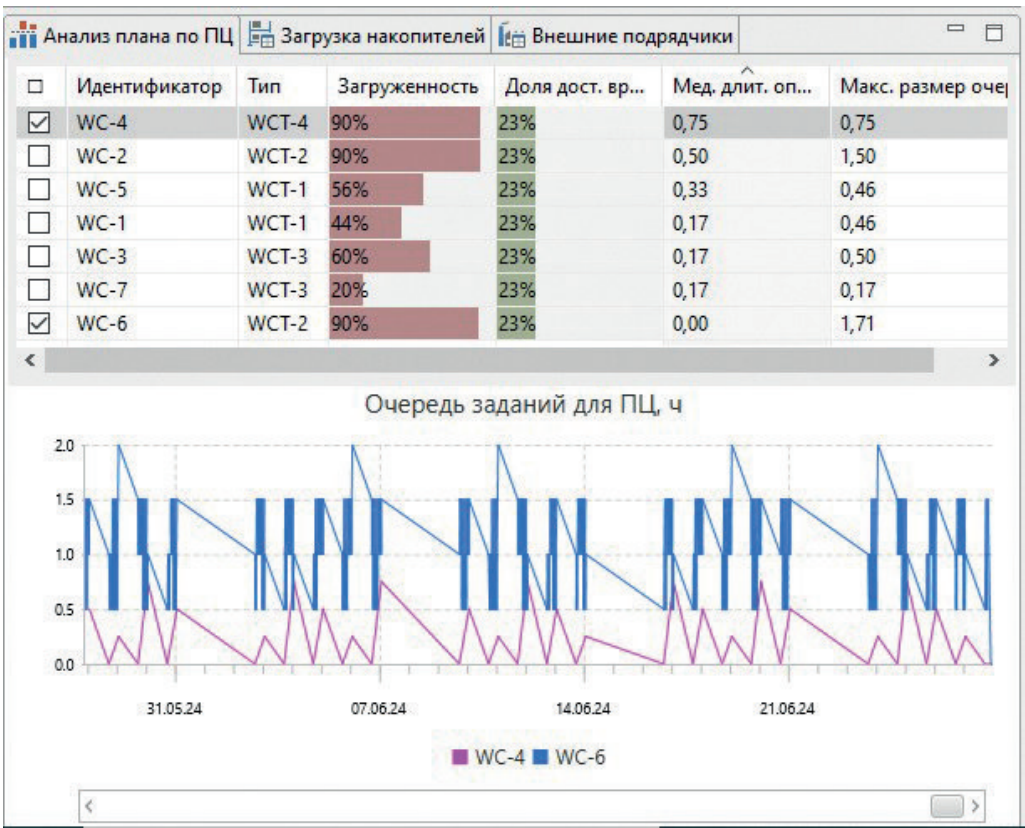


Рис. 8. Циклограммы загрузки оборудования, занятого в изготовлении изделия Кронштейн в виде диаграммы Ганта. В модели обозначены: WC-4, WC-6 – гальванические ванны; WC-2 – верстак. Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

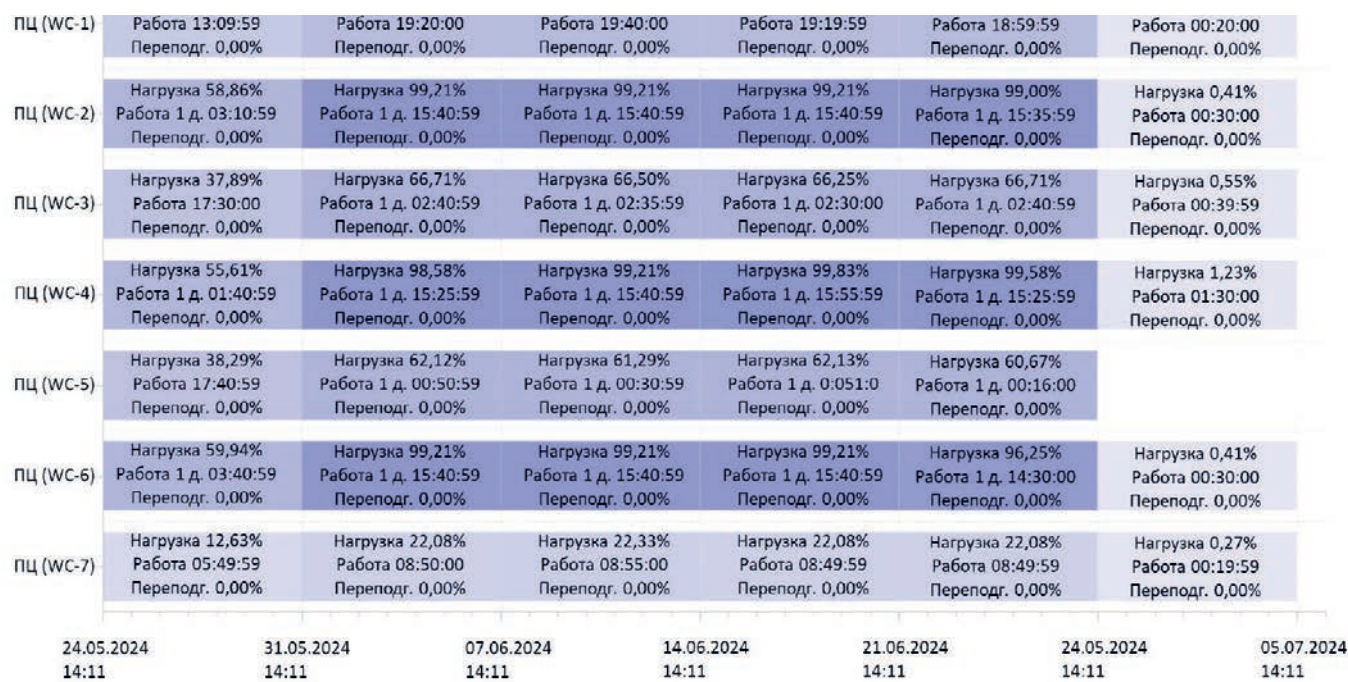


Рис. 9. Диаграмма степени загрузки оборудования, занятого в изготовлении изделия «Кронштейн». Насыщенные цвета наиболее загруженных производственных центров WC-2, WC-4, WC-6 соответствуют сборочному верстаку и гальваническим ваннам. Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

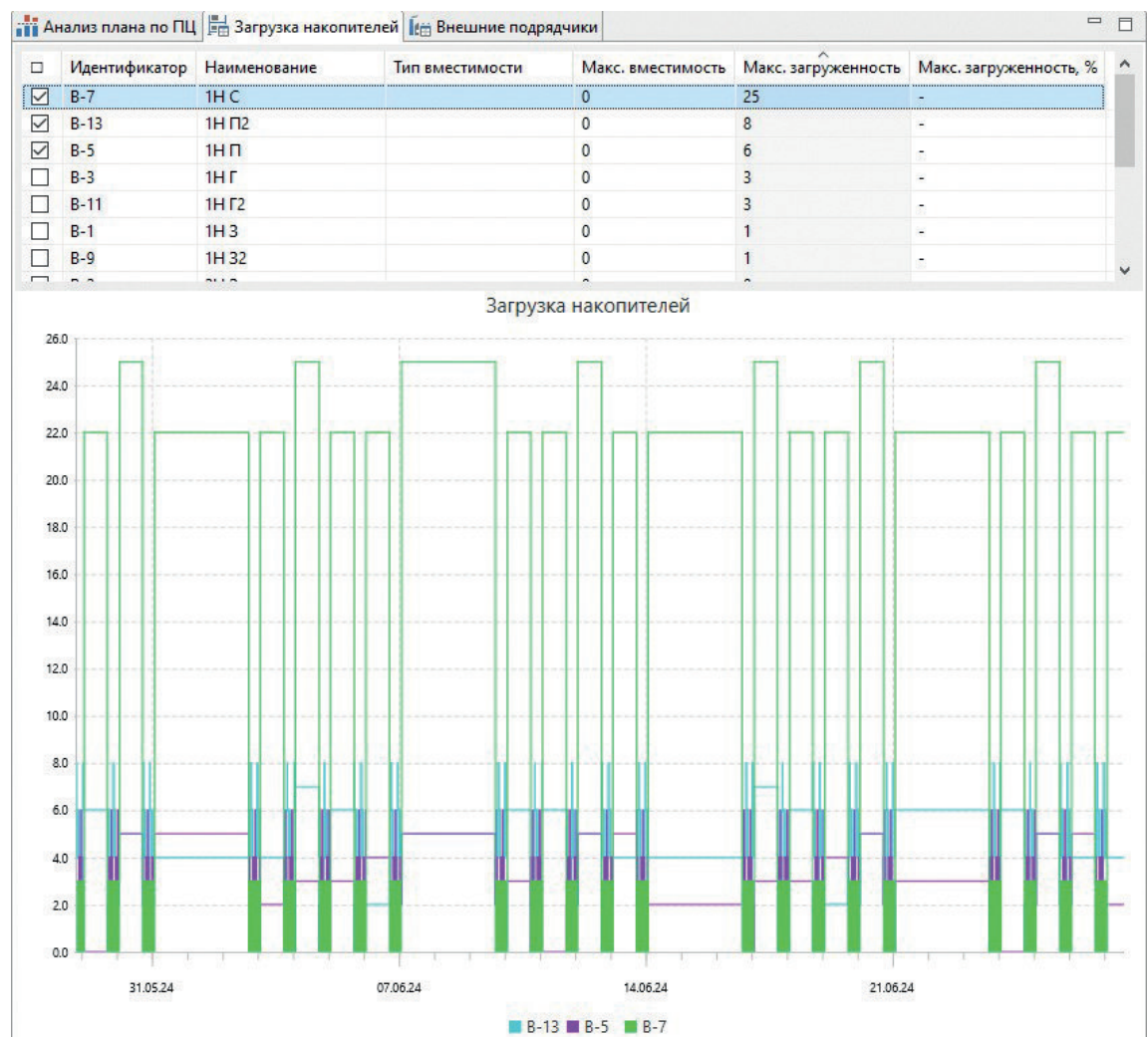


Рис. 10. Циклограмма загрузки накопителей. В модели обозначены: 1НС – накопитель сборки, 1НП, П2 – накопители на рабочих местах окрашивания.
Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

можно также идентифицировать по максимальному значению количества изделий в накопителе перед сборочной операцией (рис. 10).

Таким образом, у специалиста, занимающегося анализом производства, в результате применения моделей появляется ясная картина плотности и динамики производственных потоков в цеху, включая сигнальные индикаторы ограничений потоков («узких мест»). В том числе он получает поэкземплярные данные по жизненному циклу основных объектов производственной системы: изделий и их составных компонентов, процессов, производственных ресурсов, которые далее могут быть укрупнены и проанализированы в различных разрезах с использованием BI-систем (системы бизнес-анализа, сокращ. от англ. Business Intelligence).

Сравнительный анализ подходов к анализу производственных систем

На основе вышеприведенного описания составлена

таблица сравнительного анализа рассматриваемых подходов с акцентом на особенности каждого из них по следующим группам признаков: возможности, целевая область применения, переиспользование, поддержка, чувствительность к изменениям (табл. 1).

Заключение

Обобщая приведенные выше результаты исследования, отражающие особенности и варианты использования рассматриваемых методов, сформулируем их в кратком виде ниже.

КПСЦ – простой в освоении инструмент для анализа эффективности организации производственных потоков по линейной схеме, что делает его полезным при рассмотрении производственных потоков изготовления единицы номенклатуры. Он дает возможность понять, насколько эффективно выстроена производственная цепочка относительно технологического процесса изготовления. С учетом отсутствия барьеров для внедрения

Группа признаков сравнения	Признаки сравнения	Построение карт потоков создания ценности	Имитационное моделирование потоков
1	2	3	4
1. Возможности	1.1. Визуализация	→ Графика 2D в специальной нотации; → Только в статическом представлении.	→ Графика 2D/3D на плане цеха; диаграммы: PERT, Ганта; → В статическом и динамическом представлении.
	1.2. Образмеривание	→ Длительность операций; кол-во изделий на операцию; кол-во исполнителей; размер межоперационного хранения.	→ То же; → Дополнительно: задание диапазона времени длительности операций; правила распределения и маршрутизации потоков; задание состава и количества производственных ресурсов и правил их работы.
	1.3. Расчет	→ Длительность цикла, производительное и непроизводительное время.	→ То же; → Дополнительно: OEE, MCE; размеры НЗП, очереди на обработку и др.
	1.4. Анализ	→ Сбалансированность потока; «узкие места» потока; потери.	→ То же; → Дополнительно: циклограммы загрузки ресурсов; графики потребности в комплектующих; состояния ЖЦ каждого из элементов производственной системы и др.
2. Целевая область применения	2.1. Продукция: 2.1.1. Кол-во компонентов 2.1.2. Кол-во номенклатуры	→ Малокомпонентная → Малономенклатурная → Строятся для монопотоков, т.е. для каждой единицы номенклатурной позиции – своя карта.	→ Многокомпонентная → Многономенклатурная → Строятся для анализа сложных производств со смешением потоков номенклатурной продукции.
	2.2. Производство: 2.2.1. Виды 2.2.2. Типы 2.2.3. Размерность	→ Единичное, мелкосерийное, серийное – однотипной продукции. → Небольшие производства или производственные подразделения с линейным способом организации.	→ Мелкосерийное, серийное, массовое. → Многономенклатурные производства с сетевым способом организации. → Массовые производства – для задач синхронизации конвейерного производства.
	2.3. Этап ЖЦ производства 2.3.1. Проект 2.3.2. Новое 2.3.3. Текущее 2.3.4. Модернизация	→ Текущее → Модернизация → Как правило, для улучшения показателей существующего производства.	→ Проект → Модернизация → Текущее → Новое → Как правило при проектировании или модернизации производств для подтверждения их проектных показателей.
	2.4. Заказчики продукции	→ Один или несколько заказчиков продукции.	→ Много заказчиков продукции с разными объемами заказов.
	2.5. Пользователи/специалисты – требования к квалификации	→ Как правило, собственные специалисты, прошедшие курсы в области бережливого производства.	→ Как правило, внешняя компетенция, модель разрабатывается и анализируется под проект.
	2.6. Деятельность	→ Текущая деятельность (производство) → Обучение сотрудников → Используется преимущественно для анализа текущей деятельности и обучения сотрудников.	→ Текущая (производство) → Подготовка производства → Используется преимущественно для анализа проектных состояний.
	2.7. Виды анализа	→ Описательная аналитика → Диагностическая аналитика → Преимущественно: ретроспектива.	→ То же; Дополнительно: → Предиктивная аналитика → Предписывающая аналитика (в связке с системами ИИ). → Преимущественно: перспектива (возможность моделирования будущих состояний).

3. Переиспользование	Степень переиспользования	Как правило, слабая, под проект. Реже, в постоянном режиме силами собственных leap-подразделений. Переиспользование ограничено способом материализации информации и слабыми возможностями интеграции с ИТ-системами предприятия.	Как правило, слабая, под проект. Переиспользование ограничено отсутствием собственных специалистов по моделированию.
4. Поддержка	Возможность поддержки	Слабая, особенно, в случае с многономенклатурными производствами. Поддержка ограничена способом материализации информации и слабыми возможностями интеграции с ИТ-системами предприятия.	Слабая, как правило, только на этапе проекта. Поддержка ограничена отсутствием собственных специалистов по моделированию и необходимостью интеграции с ИТ-системами предприятия.
5. Чувствительность к изменениям	Степень чувствительности к изменениям	Сильная, при большом объеме карт, требует автоматизации.	Слабая, т.к. требует внесения небольших изменений в базовую цифровую модель.
6. Достоверность	Степень достоверности	Высокая для монопотоков, т.к., как правило, данные снимаются непосредственно в производственных подразделениях.	Степень достоверности зависит от качества исходных данных, а также от корректности принятых ограничений модели.

Принятые сокращения в таблице:
ИИ – технологии искусственного интеллекта;
ЖЦ – жизненный цикл;
НЗП – незавершенное производство;
MCE – Manufacturing Cycle Effectiveness, с англ. показатель эффективности операционного цикла изделия;
OEE – Overall Equipment Effectiveness, с англ. показатель общей эффективности оборудования;
PERT – диаграмма метода Project Evaluation Review Technique, с англ. метод оценки и анализа проектов.

Табл. 1. Сравнение подходов к анализу производственных систем дискретного типа с использованием КПСЦ и имитационного моделирования.
Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

в виде временных и финансовых затрат эта технология в наибольшей степени подходит для обучения сотрудников на первых этапах анализа производства. Для комплексного анализа многономенклатурных производств, в которых линейные потоки накладываются друг на друга, анализ с использованием КПСЦ затруднен или невозможен.

Исследование потоков с помощью метода имитационного моделирования – инструмент более сложный в освоении и использовании, но позволяющий проводить анализ многономенклатурных производств и производств с сетевым способом организации. В сравнении с КПСЦ гибкость анализа намного выше, что является существенным преимуществом при анализе производств с быстроизменяющимся спросом и важно с точки зрения возможности оценки большего количества альтернативных конфигураций производства. Временные затраты на разработку модели компенсируются дальнейшим ее переиспользованием. При большом количестве номенклатуры и оборудовании пакетная обработка вход-

ных и выходных данных также является определяющим критерием выбора в пользу моделирования.

Выделим два фактора, имеющих основное значение для внедрения цифровой модели: сложность и вопрос достоверности модели.

Рекомендации заключаются в получении синергии от применения обоих подходов: использовании выразительных возможностей КПСЦ, понятийного аппарата бережливого производства (потерь, их классификации и др.) – как человеко-ориентированного подхода; вычислительного и визуального потенциала цифровой модели – как перспективы выхода на построение цифрового двойника анализируемого производства.

Существующий задел (при наличии) в виде построенных КПСЦ с успехом может быть задействован при разработке модели производства в качестве исходных данных, так как карты являются концентрированным источником информации о наиболее важных характеристиках потока в противовес сегментированным данным разных ИТ-систем, форматам их представления и распо-

ложения на разных рабочих местах. В наибольшей степени пригодны для использования карты в электронном редактируемом формате. КПСЦ в бумажном виде или КПСЦ в электронном не редактируемом формате невозможно обработать с помощью нейросетевых технологий.

Кроме этого, задел будет очень полезен при оценке достоверности модели. В одном из проектов, выполненных с участием авторов, существующие карты, построенные ранее для производственной системы механического узла, были с успехом использованы для валидации модели производства. Разница в оценках длительности производственного цикла по результатам

картирования и моделирования составила не более 5%.

Новые карты рекомендуется разрабатывать при первоначальном обучении специалистов по анализу и проектированию производств. Не рекомендуется использование графических редакторов для этих целей. Необходимы инструменты, в которых как минимум предусмотрена интеграция с табличным процессором Excel. В дальнейшем это позволит автоматизированным способом интегрировать и объединить данные карт, разработанные разными исполнителями для разной номенклатуры, в рамках цифровой модели производства для более глубокого анализа.

Список литературы

1. Кольберг Д. Автоматизация бережливого производства на базе технологий Индустрии 4.0 / Д. Кольберг. – Текст: непосредственный // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Т. 2, № 43. – С. 1870-1875.
2. Гурьев Е. К. Имитационное моделирование производственных возможностей предприятий космического машиностроения / Е. К. Гурьев. – Текст: электронный // Научные чтения памяти К.Э. Циолковского, Секция 9 «К.Э. Циолковский и проблемы космического производства». – Калуга, 2004. – URL: <https://readings.gmik.ru/lecture/2004-IMITATIONNOE-MODELIROVANIE-PROIZVODSTVENNIH-VOZMOZHNOSTEY-PREDPRIYATY-KOSMICHESKOGO-MASHINOSTROENIYA> (дата обращения: 22.04.2024).
3. Якимов А. И. Имитационное моделирование сложного дискретного производственного процесса на основе ПТКИ BelSim / А. И. Якимов, К. В. Захарченков, Р. В. Петров. – Текст: непосредственный // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2005. – № 5 (32). – С. 135-137.
4. Горбач В. Д. Практическое использование методов имитационного моделирования для анализа производственных процессов в сложных технических системах / В. Д. Горбач, А. М. Плотников, М. А. Долматов, И. Е. Любимова. – Текст: непосредственный // Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении-2005», Санкт-Петербург. – 2005. – С. 86-88.
5. Торторелла Г. Л. Сравнение достижений Индустрии 4.0 и бережливого производства между производителями из развивающихся и развитых стран / Г. Л. Торторелла, М. Россини, Ф. Коста, А. Портиоли Штаудахер, Р. Сони. – Текст: непосредственный // Общее управление качеством и совершенство бизнеса. – 2019. – С. 1-22.
6. Саад С. Индустрия 4.0 и бережливое производство – систематический обзор современной литературы и ключевые рекомендации для будущих исследований / С. Саад, Бахадори, Рамин, Ч. Бховар, Х. Чжан. – Текст: непосредственный // International Journal of Lean Six Sigma. – 2023. – № 15. – С. 341-346.
7. Ротер М. Учитесь видеть бизнес-процессы: Построение карт потоков создания ценности / М. Ротер, Д. Шук; перевод Г. Муравьева. – 4-е, изд. – Москва: Альпина Паблицер, 2016. – 136 с. – ISBN 978-5-9614-5266-2. – Текст: непосредственный.
8. Лычкина Н. Н. Имитационное моделирование экономических процессов: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 254 с. – ISBN 978-5-16-004675-4. – Текст: непосредственный.
9. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем: учебное пособие / Т. И. Алиев. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2009. – 363 с. – ISBN 978-5-7577-0336-7. – Текст: непосредственный.
10. Кабанов А. А. Цифровое моделирование и имитирование систем аэрокосмического производства с целью управления операционной эффективностью / А. А. Кабанов, М. Ю. Мохов, И. А. Федоров. – Текст: непосредственный // Экономика космоса – 2022. – № 1 (1) – С. 57-68. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2022.01.01.09.

List of literature

1. Kolberg, D. Automation of lean production based on Industry 4.0 technologies / D. Kolberg. – Text: direct // IFAC-Paperonline. – 2015. – Vol. 2, No. 43. – pp. 1870-1875.
2. Guryev, E. K. Simulation modeling of production capabilities of space engineering enterprises / E. K. Guryev. – Text: electronic // Scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky, Section 9 “K.E. Tsiolkovsky and problems of space production”. – Kaluga, 2004. – URL: <https://readings.gmik.ru/lecture/2004-IMITATIONNOE-MODELIROVANIE-PROIZVODSTVENNIH-VOZMOZHNOSTEY-PREDPRIYATIY-KOSMICHESKOGO-MASHINOSTROENIYA> (accessed: 22.04.2024).
3. Yakimov, A. I. Simulation modeling of a complex discrete production process based on BelSim PTKI / A. I. Yakimov, K. V. Zakharchenkov, R. V. Petrov. – Text: direct // Proceedings of the Gomel State University named after F. Skoriny. – 2005. – № 5 (32). – pp. 135-137.
4. Gorbach, V. D. Practical use of simulation modeling methods for the analysis of production processes in complex technical systems / V. D. Gorbach, A.M. Plotnikov, M. A. Dolmatov, I. E. Lyubimova. – Text: direct // Collection of reports of the VI All-Russian scientific and practical conference of Marine engineering practitioners “Information technologies in shipbuilding-2005”, St. Petersburg. – 2005. – pp. 86-88.
5. Tortorella, G. L. A comparison of Industry 4.0 and Lean Production between manufacturers from emerging and developed economies / G. L. Tortorella, M. Rossini, F. Costa, A. Portioli Staudacher, R. Sawhney. – Text: direct // Total quality management & business excellence. – 2019. – pp. 1-22.
6. Saad, S. Industry 4.0 and Lean manufacturing – A systematic review of the state of the art literature and key recommendations for future research / S. Saad, Bahadori, Ramin, C. Bhovar, H. Zhang. – Text: direct // International Journal of Lean Six Sigma. – 2023. – № 15. – pp. 341-346.
7. Roter, M. Learn to see business processes: Building value stream maps / M. Roter, D. Shuk; translated by G. Muraviev. – 4th, ed. – Moscow: Alpina Publisher, 2016. – 136 p. – ISBN 978-5-9614-5266-2. – Text: direct.
8. Lychkina, N. N. Simulation modeling of economic processes: Textbook. – M.: INFRA-M, 2014. – 254 p. – ISBN 978-5-16-004675-4. – Text: direct.
9. Aliyev, T. I. Fundamentals of modeling discrete systems: a textbook / T. I. Aliyev. – St. Petersburg: NRU ITMO, 2009. – 363 p. – ISBN 978-5-7577-0336-7. – Text: direct.
10. Kabanov, A. A. Digital modeling and simulation of aerospace production systems for the purpose of operational efficiency management / A. A. Kabanov, M. Yu. Mokhov, I. A. Fedorov. – Text: direct // Space economics. – 2022. – № 1 (1) – pp. 57-68. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2022.01.01.09.

Рукопись получена: 13.05.2024

Рукопись одобрена: 20.06.2024