

Научная статья

УДК 658.51

DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-1-67-80

Разработка автоматизированной системы динамического картирования потока создания ценности

Полина Андреевна Русских¹
Денис Владимирович Капулин²
Олег Владимирович Дрозд³
Сергей Юрьевич Смоглюк⁴

¹⁻⁴ Сибирский федеральный университет
Красноярск, Россия

¹ Prusskikh@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2858-2893>

² Dkapulin@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4260-1408>

³ Odrozd@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7374-253X>

⁴ xor-s@yandex.ru

Аннотация

Существующие тенденции развития производства диктуют необходимость повышения конкурентоспособности путем преодоления разрыва между организацией производства и цифровыми технологиями. Чтобы повысить эффективность производства, внедряются стратегии бережливого производства, которые сосредоточены на выявлении и минимизации потерь и их устранения. При этом возможности цифровой трансформации позволяют осуществлять мониторинг производственных процессов в режиме реального времени. Таким образом можно использовать инструменты бережливого производства, такие как карта потока создания ценности для эффективно фиксирования процессов и прогнозирования производственной ситуации в динамическом режиме. В разработанной автоматизированной системе динамического картирования потока создания ценности реализован принцип имитационного моделирования. При помощи моделирования можно изучить альтернативы улучшения процесса и влияние предложенных изменений до реализации. Динамическое моделирование карты потока создания ценности позволяет разработать систему автоматизированного управления с определения оптимальных параметров и режимов функционирования производственного процесса. Объектом моделирования является карта потока создания ценностей, отображающая этапы перемещения потоков материалов, деталей, сборочных единиц и информации. Чтобы исследовать параметры производственного процесса и внедрить принципы бережливого производства, было реализовано динамическое отображение потока создания ценности текущего состояния и моделирование будущего состояния.

Ключевые слова

карта потока создания ценности, бережливое производство, имитационное моделирование, автоматизированная система

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00226

Для цитирования

Русских П. А., Капулин Д. В., Дрозд О. В., Смоглюк С. Ю. Разработка автоматизированной системы динамического картирования потока создания ценности // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Т. 20, № 1. С. 67–80. DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-1-67-80

© Русских П. А., Капулин Д. В., Дрозд О. В., Смоглюк С. Ю., 2022

Development of an Automated System for Dynamic Mapping of the Value Stream

Polina A. Russkikh¹, Denis V. Kapulin²
Oleg V. Drozd³, Sergey Yu. Smogluk⁴

¹⁻⁴ Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

¹ Prusskikh@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2858-2893>

² Dkapulin@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4260-1408>

³ Odrozd@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7374-253X>

⁴ xor-s@yandex.ru

Abstract

The current trends in the development of production dictate the need to increase competitiveness by bridging the gap between the organization of production and digital technologies. To improve production efficiency, lean manufacturing strategies are being implemented that focus on identifying and minimizing waste and eliminating them. At the same time, the capabilities of digital transformation allow monitoring of production processes in real time. Thus, it is possible to use lean manufacturing tools such as a value stream map to effectively capture processes and predict the production situation in a dynamic mode. In the developed automated system for dynamic mapping of the value stream, the principle of simulation is implemented. With the help of simulations, it is possible to study the alternatives for improving the process and the impact of the proposed changes before implementation. Dynamic modeling of the value stream map allows you to develop an automated control system with the definition of optimal parameters and modes of operation of the production process. The object of modeling is a value stream map that displays the stages of movement of flows of materials, parts, assembly units and information. To investigate the parameters of the production process and implement the principles of lean manufacturing, dynamic mapping of the current state value stream and modeling of the future state were implemented.

Keywords

value stream map, lean manufacturing, simulation, automated system

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project no. 20-07-00226

For citation

Russkikh P. A., Kapulin D. V., Drozd O. V., Smoglyuk S. Yu. Development of an Automated System for Dynamic Mapping of the Value Stream. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 67–80. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-1-67-80

Введение

Очевидно, что эра массового производства сменяется эрой производства под заказ [1]. Ключевым фактором, позволяющим разрабатывать продукцию под требования клиента, при этом сохраняя низкую стоимость и высокое качество товара, является короткий цикл технологической подготовки производства. Раньше, сразу после выхода новой продукции можно было наблюдать долговременный устойчивый рост объемов производства, затем следовал спад. В настоящее время объемы производства гораздо быстрее достигают количественного пика, но и сокращение производственного объема происходит резко, чаще всего из-за модификации продукта [2]. Новый тип жизненных циклов и растущее число моделей и вариантов продукции повышает сложность производственных процессов. Надежная поставка индивидуальных продуктов имеет наивысший приоритет на глобально распределенных рынках, и этот приоритет все больше определяет потребность в развитии продуктов, процессов и производственных мощностей [3; 4]. На физическом уровне производственные и сборочные системы должны быть реконфигурируемыми, а завод с его технической инфраструктурой, включая здание, должен быть трансформируемым. Логический уровень требует систем планирования, способных реагировать на изменения в дизайне продукта [5]. Планирование и контроль производства должны реагировать на изменения в объеме продукции, смешивать или реконфигурировать технологические планы. Изменение объемов производства и но-

менклатуры комплектующих изделий приводит к постоянным корректировкам производственного плана, использованию «ручных» методов управления, влечет за собой неравномерную и малоэффективную загрузку мощностей, нерациональное использование ресурсов. В этом контексте оптимизация использования ресурсов является актуальной проблемой для производства. В то время как заводы, производящие стандартизированную продукцию большими объемами, удовлетворены существующими методами планирования, для мелкосерийного позаказного производства с большим числом номенклатуры изделий не существует достаточно эффективных методов [6].

Для повышения эффективности производства появились два независимых подхода: стратегии бережливого производства, ориентированные на выявление и минимизацию действий, не создающих добавленной стоимости, и подход к производственному планированию MRP II, на основе которого разработаны информационные инструменты для планирования и контроля деятельности [7]. Существующие автоматизированные системы для планирования и поддержки управленческих решений, такие как ERP, MES, APS системы для приборостроительных предприятий, работающих позаказно и мелкой серией, не обеспечивают адаптивности. Эти системы, помимо своей высокой стоимости, нуждаются в специальной доработке и сопровождении под нужды конкретного предприятия. Традиционно карта потока создания ценности используется для быстрого анализа потоков продукции через производственную систему, от сырья до доставки. Любое производство выполняет последовательность шагов, чтобы предоставить клиентам продукт. Поток создания ценности можно рассматривать как поток материалов или информации, необходимый для доставки товара или услуги от заказа до доставки.

Классический подход разработки карты потока создания ценности не учитывает динамический аспект операций и ассортимент продукции, которые могут быть одновременно на производстве. Он применим только для визуализации производственных линий с одним продуктом или семейством продуктов, и его трудно применить для сложных производств с множественными условиями потока материалов и продуктов [8]. Отсутствие автоматизации в создании карты потока создания ценности делает процесс визуализации утомительным и трудоемким, когда эксперт должен провести несколько «прогулок» по цеху и потратить много времени на анализ [9]. Рабочие места современных производств обладают высокой степенью автоматизации и в целом подходят для обработки большого количества продуктов. Логистические процессы продуктовых линеек отличаются друг от друга, поэтому мы можем получить очень сложную систему материальных и информационных потоков (например, при производстве мелкосерийных компонентов). Соответственно существует потребность в представлении метода с логикой для автоматизации процесса создания и анализа диаграмм, позволяющих повышать эффективность планирования производственных процессов. Отображение динамического потока создания ценности основано на принципе имитационного моделирования, поэтому карта текущего и будущего состояния создается с помощью симуляции.

Моделирование для динамической карты потока создания ценности

Одним из главных ограничений классического подхода к картированию потока создания ценности является его «ручной» характер, создающий статическую модель, что делает невозможным оценку состояния производства в динамике [10]. Имитационное моделирование способно улучшить карту потока создания ценности, предоставляя информацию о характере производственного процесса, таким образом преодолевается статичность. Использование моделирования предоставляет возможность изучить различные варианты улучшения процесса и влияние предложенных изменений до реализации.

Наиболее частым методом моделирования, используемым для описания производственных процессов, является моделирование дискретных событий, т. е. численное решение сис-

тем массового обслуживания [11]. Система массового обслуживания представляет собой объект, содержащий один или несколько приборов, обслуживающий заявки, поступающие в систему и накопитель, в котором находятся заявки, образующие очередь и ожидающие обслуживания. Очереди ожидания существуют почти во всех промышленных и производственных процессах. Во всех таких системах очередей есть объекты, которые должны повторно обрабатываться другим объектом. Очереди характеризуются рядом свойств, которые представляют взаимосвязи между объектами, участвующими в системе очередей. Процесс поступления, продолжительность обслуживания и дисциплина очереди являются одними из наиболее важных свойств очереди. В дополнение к этим основным свойствам, количество серверов, емкость очереди и совокупность обслуживаемых объектов являются некоторыми другими свойствами системы очередей.

Дисциплина очереди определяется как набор правил на основе определенного атрибута сущностей. Он определяет порядок, по которому элементы в очереди получают услугу. Выбор дисциплины очереди и применяемых правил может существенно повлиять на количество объектов, ожидающих в очереди, среднее время ожидания и эффективность средства обслуживания. Наиболее распространенная дисциплина очереди – «первым пришел – первым вышел», или FIFO, при которой клиенты в очереди обслуживаются в соответствии с хронологическим порядком прибытия. Хотя FIFO уже давно используется в качестве дисциплины очереди по умолчанию при моделировании систем очередей, во многих сценариях одинаково вероятно, что клиенты будут обслуживаться в соответствии с другими шаблонами. Например, дисциплина «последний пришел – первый ушел», или LIFO, может иметь место в ситуациях, когда куча или стопка клиентов (например, сырье, сборные бетонные сегменты, стальные секции) ожидают обработки сервером [12].

В системе массового обслуживания процесс поступления может быть определен последовательностью времени между прибытиями, которые являются независимыми и идентично распределенными в качестве упрощающего предположения, чтобы соответствовать распределениям вероятностей с фиксированными параметрами. Случайность, связанная с соперничаящими событиями, позволяет легко охарактеризовать время между встречами с помощью распределения вероятностей. Сервисный объект может иметь разное количество каналов и фаз. При наличии более одного сервера каналы относятся к доступным маршрутам, по которым клиенты могут пройти после ожидания в очереди, чтобы добраться до объекта обслуживания.

Представим производство в виде системы массового обслуживания (рис. 1). Для производства существует набор заказов, которые должны быть произведены. Учитывая тот факт, что планово-учетной единицей планирования мелосерийного многономенклатурного производства является заказ, для моделирования работы производства в качестве заявок на обслуживание используется набор операций, необходимых к выполнению. Операции, необходимые к выполнению, получают из разузлования заказа, соответственно, интенсивность поступления операций, необходимых к выполнению рабочими местами, не является существенным показателем. Все операции, необходимые для выполнения заказа, появляются в очереди на обслуживание, как только заказ поставлен на выполнение. Сделаем допущение, что длина очереди не ограничена, система может содержать сколько угодно большое число заявок, и подразумевается политика приоритетов FIFO.

Система массового обслуживания характеризуется числом каналов обслуживания n , длительностью обслуживания $t_{об}$ одной заявки и пропускной способностью μ – числом заявок, которое может обслужить один канал (или n каналов) в единицу времени. Отношение

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_{об}}{t_{и}} \quad (1)$$

называется коэффициентом использования системы, или приведенной плотностью потока.

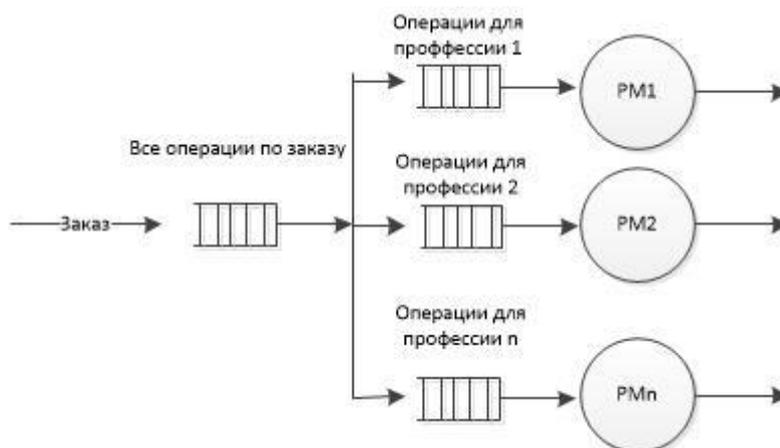


Рис. 1. Модель производства в виде СМО
 Fig. 1. Model of production in the form of a queuing system

Показатели работы СМО: вероятность того, что система свободна (2); вероятность того, что заявка окажется в очереди (3); длина очереди (4); среднее число заявок в системе (5); среднее время пребывания заявок в очереди (6); среднее время пребывания заявки в системе (7), – рассчитываются по следующим формулам:

$$p_0 = \left(\sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)} \right)^{-1}, \quad (2)$$

$$P_q = \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)} p_0, \quad (3)$$

$$L_q = \frac{\rho^{n+1} p_0}{n n! (1 - \frac{\rho}{n})^2}, \quad (4)$$

$$L_s = L_q + \rho, \quad (5)$$

$$T_q = \frac{L_q}{\lambda}, \quad (6)$$

$$T_s = \frac{L_s}{\lambda}. \quad (7)$$

Заказы в имитационную модель (рис. 2) поступают в заданный диапазон времени, например каждые 3–5 часов, ожидаемый диапазон – 3–5 заказов. Согласно разработанной архитектуре из базы данных в имитационный модуль поступают данные о технологических операциях, необходимых для изготовления изделия. Заказы на все изделия представляют собой набор операций, необходимых к выполнению для реализации производственного плана. Данный документ содержит информацию о длительности работ, оснастке, типе рабочих, нормах времени по каждой операции.

Источником поступления заказа в систему служит блок Source. В нем задаются условия интенсивности поступления заказов в систему. Рабочие места представлены блоком Service, который реализует очередь операций к рабочему месту, захват необходимого ресурса и его освобождения при выполнении операции. Очереди задаются блоками Queue. Имитационная модель содержит источник заказов, куда поступают заказы клиентов, рабочие места по необходимому типу операции, очереди, в которых заказы будут ожидать, если пропускная способность соответствующих последующих шагов окажется недостаточной, и узел-приемник в качестве завершения процесса.

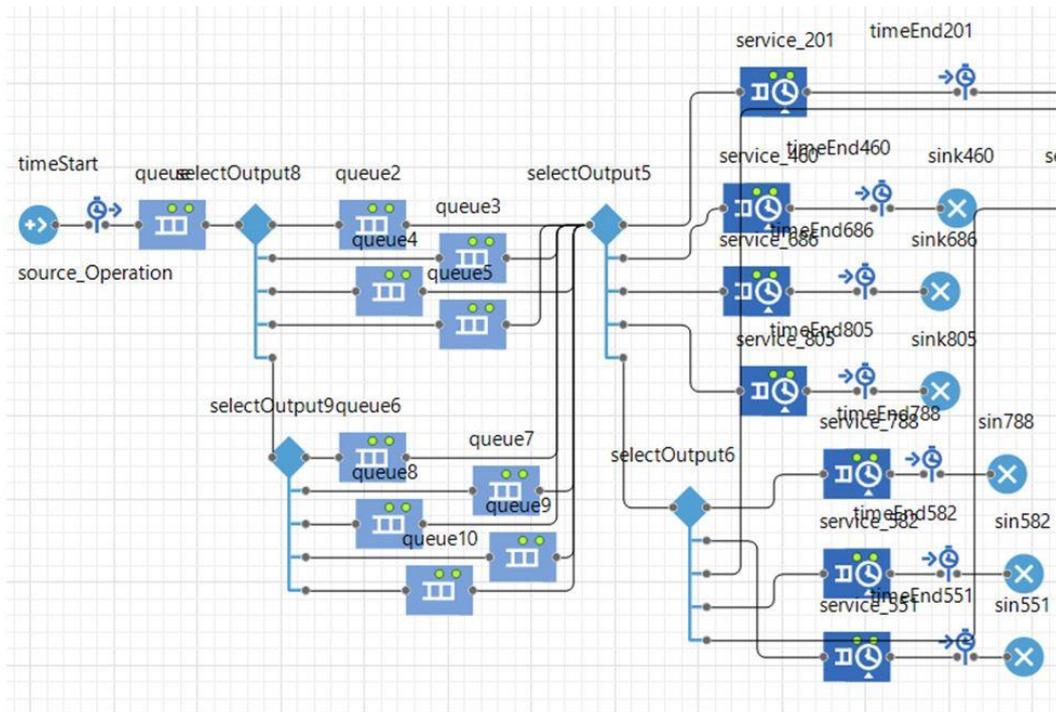


Рис. 2. Имитационная модель производства
 Fig. 2. Production simulation model

Метод формирования динамической карты потока создания ценности

Сегодня многие производства используют философию «бережливого внедрения», направленную на сокращение потерь за счет устранения неэффективности в потоке создания ценности [13]. Потери можно определить как любую деятельность, которая не добавляет ценности конечному продукту. В производственной среде потери могут включать, например, перепроизводство, лишние движения (например, оператора или машины), время ожидания (например, оператора или машины), транспортировка, ненужная обработка, избыточный инвентарь и переделка. Чтобы оставаться конкурентоспособными на мировом рынке, предприятия разработали инструменты планирования и коммуникации для повышения эффективности и сокращения потерь [14]. Основная философия внедрения бережливого производства в управление технологическим процессом заключается в устранении неэффективности и улучшении экономических показателей, что достигается за счет сосредоточения внимания на определении сроков производства, которые соответствуют или превышают требования заказчика. Поток создания ценности – это шаги, которые бизнес должен предпринять, чтобы предоставить клиенту желаемые товары или услуги.

Типичный поток создания ценности начинается с заказа клиента и заканчивается доставкой. Карта потока создания ценности (КПСЦ) – это инструмент, который наглядно иллюстрирует поток материалов и информации, проходящий через поток создания ценности [15]. КПСЦ может отражать текущее или будущее состояние производства. КПСЦ – это бумажная ручная процедура с ограниченным количеством наблюдений; следовательно, уровень точности ограничен. КПСЦ создается исходя из требований заказчика и разрабатывается в соответствии с этапами технологического процесса продукта [16]. Основные потоки в КПСЦ – это информационный поток и материальный поток. Схема процесса определяет параметры, которые представляют характеристики процесса.

На рис. 3 представлены операции для формирования динамической карты потока создания ценности.



Рис. 3. Алгоритм формирования динамической карты потока создания ценности

Fig.3. Algorithm for generating a dynamic value stream map

На первом шаге при запуске моделирования через интерфейс пользователя определяется заказ или группа заказов, для которых будет построена КПСЦ. Затем необходимо преобразовать текущие параметры имитационной модели производственного процесса в формат параметров КПСЦ. Далее происходит обновление параметров КПСЦ в соответствии с текущими параметрами имитационной модели производственного процесса и визуализация текущей КПСЦ. Следующим шагом является имитационное моделирование производственного процесса с текущими параметрами КПСЦ. Потом необходимо провести проверку на наличие изменений параметров производственного процесса. При выполнении данной операции по

результатам опроса рабочих мест регистрируются изменения следующих параметров производственного цикла:

- время, необходимое для завершения технологической операции на данном рабочем месте (время цикла, ВЦ);
- время, необходимое на подготовку данного рабочего места к выполнению технологической операции (время переналадки, ВП);
- частота отгрузки объектов обработки для данного рабочего места.

После считывания измененных параметров производственного процесса происходит расчет статистических характеристик.

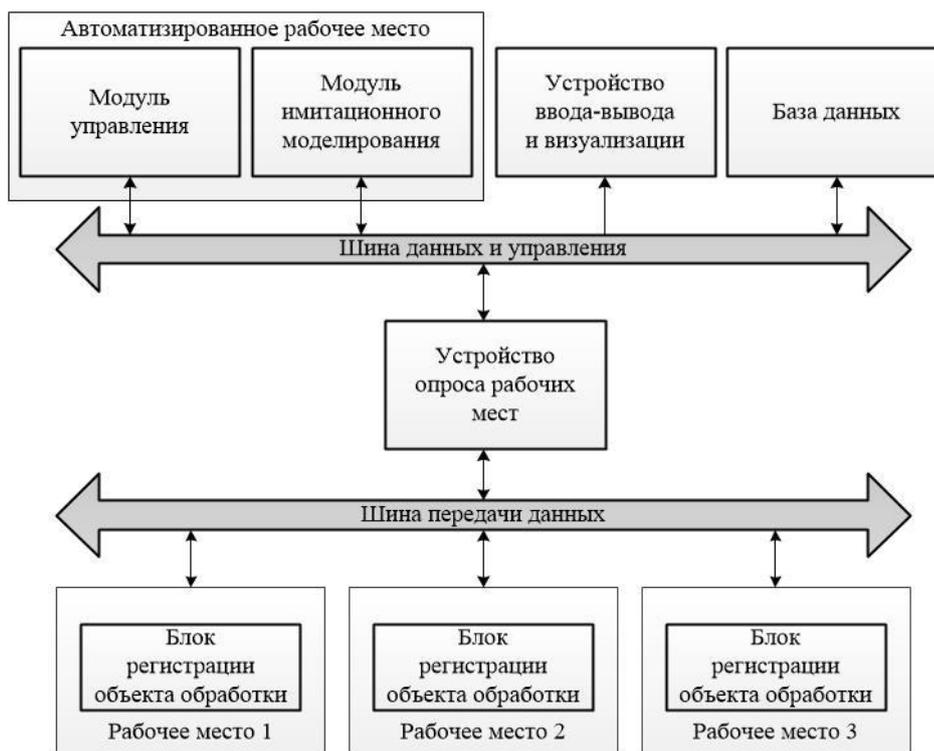


Рис. 4. Архитектура автоматизированной системы динамического картирования потока создания ценности

Fig. 4. The architecture of an automated dynamic value stream mapping system

Архитектура автоматизированной системы динамического картирования потока создания ценности представлена на рис. 4. Предлагаемая архитектура включает следующие компоненты: автоматизированное рабочее место, состоящее из модуля управления и модуля имитационного моделирования, устройство ввода-вывода и визуализации, базы данных, устройства опроса рабочих мест, блоков регистрации объекта обработки, размещенные на рабочих местах, шину передачи данных, шину данных и управления. Взаимодействие автоматизированного рабочего места устройства ввода-вывода и визуализации с базой данных обеспечивается шиной данных и управления, также данной шиной обеспечивается взаимодействие модуля опроса рабочих мест и модуля управления. Взаимодействие модуля опроса рабочих мест и блоков регистрации объекта обработки обеспечивается шиной передачи данных.

Автоматизированная система динамического картирования создания ценности

Для формирования КПСЦ необходимо преобразование текущих параметров имитационной модели производственного процесса в формат параметров КПСЦ.

Соотношение данных производства как СМО и КПСЦ Correlation of production data as queuing system and value stream map

Атрибуты СМО	Данные КПСЦ
Обслуживающие устройства	Последовательность операций
Время обслуживания	Время цикла + Время переналадки
Тип и количество ресурса	Количество операторов, выполняющих каждый процесс
Доступность обслуживающих устройств	Доступное рабочее время на каждой рабочей станции Количество рабочих дней в месяце Количество смен на каждое рабочее место
Транзакты	Размер партии
Размер очереди	Вместимость очереди не ограничена
Дисциплина очереди	FIFO – первый пришел, первый вышел
Частота поступления заявок	Количество товаров, заказанных покупателем

При выполнении данной операции преобразованию подвергаются следующие текущие параметры имитационной модели производственного процесса:

- последовательность обслуживающих устройств;
- время обслуживания заявки;
- тип и объем доступных ресурсов;
- доступность обслуживающих устройств для обработки заявок;
- свойства динамических объектов системы массового обслуживания;
- дисциплина обслуживания очереди;
- частота поступления заявок на обслуживание.

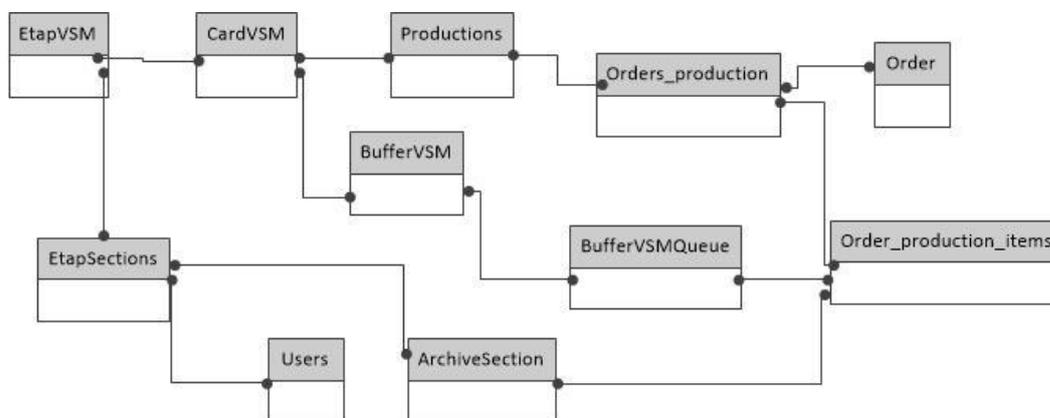


Рис. 5. Структура базы данных автоматизированной системы
Fig. 5. Database structure of the automated system

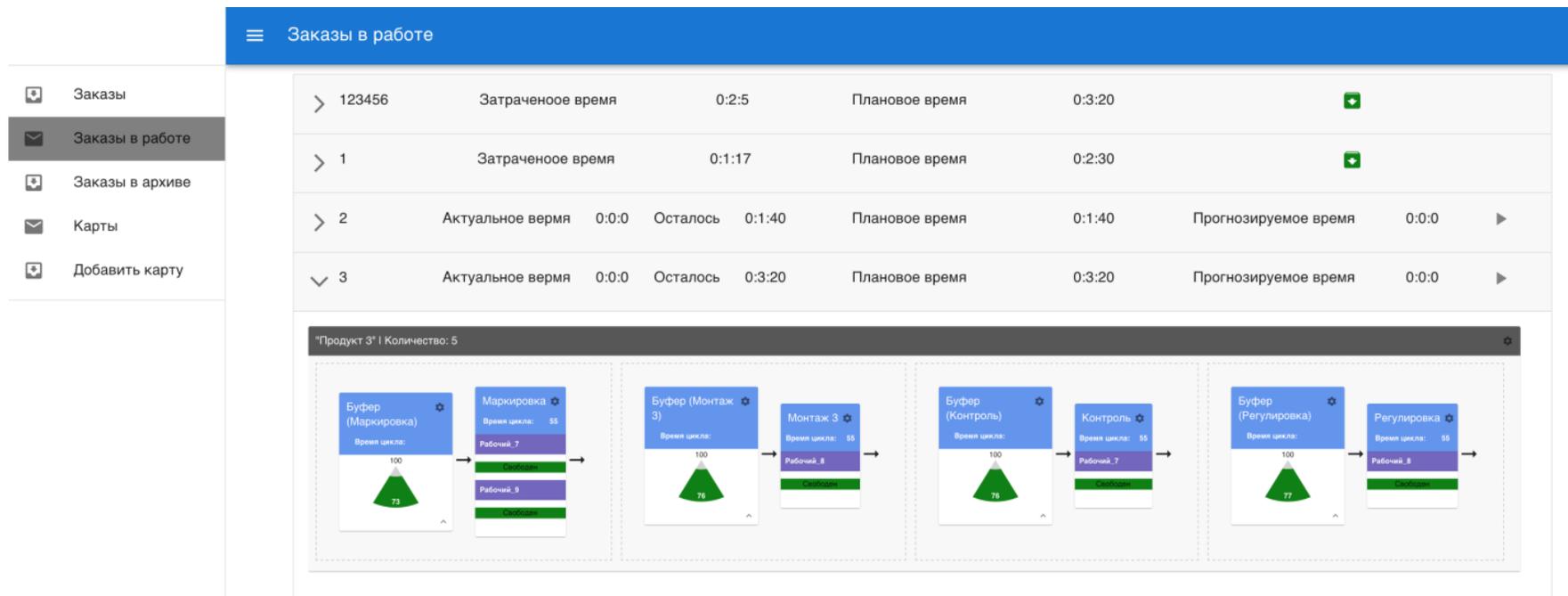


Рис. 6. Навигация программной реализации
 Fig. 6. Software implementation navigation

Структура базы данных (см. рис. 5) включает себя таблицу «CardVSM», описывающую КПСЦ конкретного продукта. Данная таблица включает следующие поля: «ProductionsId» – указывает, в каком продукте используется данная операция с буфером; «EtapNumeric» – число, указывающее на последовательность секций в карте для реализации параллельных операций; «BufferVSM» – указатель на буфер, который используется в данной карте по данному продукту из всех буферов, которые существуют в системе (внешний ключ); «EtapVSM» – указатель на операцию, которая выполняется в данной карте по данному продукту из всех операций в системе (внешний ключ). В таблице «EtapVSM» дана информация по технологическим операциям: имя, время цикла.

На рис. 6 представлено основное меню интерфейса программной реализации. Разработанная база данных позволяет отображать общий список заказов на производстве, заказов в работе, заказов в архиве. Сформировать новый заказ можно при нажатии кнопки «+», таким образом вводятся параметры заказа, количество и тип продукции, приоритет на изготовление. При нажатии кнопки «Сформировать» создается заказ в системе, но заказ при этом окрашен серым цветом, это значит, что данный заказ только сформирован, но не добавлен в производство, и симуляция данного заказа не запускалась. Заказы отображаются разными цветами в зависимости от их статуса в системе. Так, зеленым окрашивается заказ, выполнение которого не отстает от заданного планового времени. Желтым – заказы с отставанием не более чем на 10 % от планового времени, красным – отставание более 10 %. На вкладке навигации «Заказы в работе» отображаются выполняющиеся заказы, при этом показывается актуальное время работы заказа, сколько еще будет изготавливаться заказ, учитывая текущую загрузку производственных мощностей. На каждой карте желтым цветом выделяется текущий этап выполнения, серым цветом окрашены выполненные этапы, а белым – будущие.

Заключение

Подходы бережливого производства, нацеленные на сокращение потерь в производственной системе, позволяют повышать эффективность производства. Картирование потока создания ценности – это ключевой инструмент данной концепции. Его применение позволяет понять и упорядочить производственные процессы. Обычно данная методика выполняется в ручном режиме, что снижает ее эффективность. Создание динамических карт потока создания ценности позволяет анализировать и оптимизировать более сложные системы, чем традиционные КПСЦ. В статье предложен подход для мониторинга в реальном времени и моделирования карты потока создания ценности. С использованием автоматизированного сбора данных и параметров производственного процесса происходит расчет статических характеристик и параметров загрузки рабочих мест. В отличие от статичного подхода, данная система позволяет создавать динамическую карту потока создания ценности для всего числа продуктов, находящихся в производстве. Благодаря модулю симуляции пользователь может заранее изучить последствия добавления того или иного заказа в систему, возможность выполнения заказа в срок. Комбинирование реальных производственных данных и данных, полученных при помощи имитационного моделирования, позволяет как производить текущий мониторинг выполнения производственных заказов, так и эффективно оценивать будущее состояние системы.

Список литературы

1. **Gomez Paredes F. J., Godinho Filho M., Thurer M., Fernandes N. O., Chiappeta Jabbour C. J.** Factors for choosing production control systems in make-to-order shops: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020. DOI 10.1007/s10845-020-01673-z

2. **Lu Y., Xu X.** Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, vol. 47, pp. 128–140. DOI 10.1016/j.jmsy.2018.05.003
3. **Sylla A., Guillon D., Vareilles E., Aldanondo M., Coudert T., Geneste L.** Configuration knowledge modeling: How to extend configuration from assemble / make to order towards engineer to order for the bidding process. *Computers in Industry*, 2018, vol. 99, pp. 29–41. DOI 10.1016/j.compind.2018.03.019
4. **Qiu S., Ming X., Sallak M., Lu J.** Joint optimization of production and condition-based maintenance scheduling for make-to-order manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, vol. 162. DOI 10.1016/j.cie.2021.107753
5. **Kapulin D. V., Russkikh P. A.** Analysis and improvement of production planning within small-batch make-to-order production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1515, no. 2. DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022072
6. **Русских П. А., Капулин Д. В.** Анализ решений для создания и реализации механизмов адаптивного планирования позаказного производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. Т. 1, вып. 56. С. 44–48.
7. **Kishimoto K., Medina G., Sotelo F., Raymundo C.** Application of Lean Manufacturing Techniques to Increase On-Time Deliveries: Case Study of a Metalworking Company with a Make-to-Order Environment in Peru. *Human Interaction and Emerging Technologies. IHJET 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1018. DOI 10.1007/978-3-030-25629-6_148
8. **Garza-Reyes J. A., Romero J. T., Govindan K., Cherrafi A., Ramanathan U.** A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 180, pp. 335–348. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.01.121
9. **Stadnicka D., Litwin P.** Value stream mapping and system dynamics integration for manufacturing line modelling and analysis. *International Journal of Production Economic*, 2019, vol. 208, pp. 400–411. DOI 10.1016/j.ijpe.2018.12.011
10. **Antonelli D., Stadnicka D.** Combining factory simulation with value stream mapping: a critical discussion. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 67, pp. 30–35. DOI 10.1016/j.procir.2017.12.171
11. **Memon R. A., Li J., Ahmed J., Khan A., Nazir M. I., Mangrio M. I.** Modeling of Blockchain Based Systems Using Queuing Theory Simulation. *2018 15th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 2018, pp. 107–111. DOI 10.1109/ICCWAMTIP.2018.8632560
12. **Agalinos K., Ponis S.T., Aretoulaki E., Plakas G., Efthymiou O.** Discrete Event Simulation and Digital Twins: Review and Challenges for Logistics. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 51, pp. 1636–1641. DOI 10.1016/j.promfg.2020.10.228
13. **Shah R., Ward P. T.** Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, 2007, vol. 25, no. 4, pp. 785–805. DOI 10.1016/j.jom.2007.01.019
14. **Wagner T., Herrmann C., Thiede S.** Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 63, pp. 125–131. DOI 10.1016/j.procir.2017.02.041
15. **Wang P., Wu P., Chi H.L., Li X.** Adopting lean thinking in virtual reality-based personalized operation training using value stream mapping. *Automation in Construction*, 2020, vol. 119. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103355
16. **Zhu X. Y., Zhang H., Jiang Z. G.** Application of green-modified value stream mapping to integrate and implement lean and green practices: A case study. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 33, no. 7, pp. 716–731. DOI 10.1080/0951192X.2019.1667028

References

1. **Gomez Paredes F. J., Godinho Filho M., Thurer M., Fernandes N. O., Chiappeta Jabbour C. J.** Factors for choosing production control systems in make-to-order shops: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020. DOI 10.1007/s10845-020-01673-z
2. **Lu Y., Xu X.** Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, vol. 47, pp. 128–140. DOI 10.1016/j.jmsy.2018.05.003
3. **Sylla A., Guillon D., Vareilles E., Aldanondo M., Coudert T., Geneste L.** Configuration knowledge modeling: How to extend configuration from assemble / make to order towards engineer to order for the bidding process. *Computers in Industry*, 2018, vol. 99, pp. 29–41. DOI 10.1016/j.compind.2018.03.019
4. **Qiu S., Ming X., Sallak M., Lu J.** Joint optimization of production and condition-based maintenance scheduling for make-to-order manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, vol. 162. DOI 10.1016/j.cie.2021.107753
5. **Kapulin D. V., Russkikh P. A.** Analysis and improvement of production planning within small-batch make-to-order production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1515, no. 2. DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022072
6. **Russkikh P. A., Kapulin D. V.** Analiz resheniy dly sozdaniy i realizacii mekhanizmov adaptivnogo planirovaniy pozakaznogo proizvodstva [Analysis of solutions for the creation and implementation of adaptive planning mechanisms for make-to-order production]. *Vestnik MSTU STANKIN*, 2021, vol. 1, no. 56, pp. 44–48. (in Russ.) DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022072
7. **Kishimoto K., Medina G., Sotelo F., Raymundo C.** Application of Lean Manufacturing Techniques to Increase On-Time Deliveries: Case Study of a Metalworking Company with a Make-to-Order Environment in Peru. *Human Interaction and Emerging Technologies. IHET 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1018. DOI 10.1007/978-3-030-25629-6_148
8. **Garza-Reyes J. A., Romero J. T., Govindan K., Cherrafi A., Ramanathan U.** A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 180, pp. 335–348. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.01.121
9. **Stadnicka D., Litwin P.** Value stream mapping and system dynamics integration for manufacturing line modelling and analysis. *International Journal of Production Economic*, 2019, vol. 208, pp. 400–411. DOI 10.1016/j.ijpe.2018.12.011
10. **Antonelli D., Stadnicka D.** Combining factory simulation with value stream mapping: a critical discussion. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 67, pp. 30–35. DOI 10.1016/j.procir.2017.12.171
11. **Memon R. A., Li J., Ahmed J., Khan A., Nazir M. I., Mangrio M. I.** Modeling of Blockchain Based Systems Using Queuing Theory Simulation. *2018 15th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 2018, pp. 107–111. DOI 10.1109/ICCWAMTIP.2018.8632560
12. **Agalinos K., Ponis S.T., Aretoulaki E., Plakas G., Efthymiou O.** Discrete Event Simulation and Digital Twins: Review and Challenges for Logistics. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 51, pp. 1636–1641. DOI 10.1016/j.promfg.2020.10.228
13. **Shah R., Ward P. T.** Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, 2007, vol. 25, no. 4, pp. 785–805. DOI 10.1016/j.jom.2007.01.019
14. **Wagner T., Herrmann C., Thiede S.** Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 63, pp. 125–131. DOI 10.1016/j.procir.2017.02.041
15. **Wang P., Wu P., Chi H.L., Li X.** Adopting lean thinking in virtual reality-based personalized operation training using value stream mapping. *Automation in Construction*, 2020, vol. 119. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103355

16. **Zhu X. Y., Zhang H., Jiang Z. G.** Application of green-modified value stream mapping to integrate and implement lean and green practices: A case study. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 33, no. 7, pp. 716–731. DOI 10.1080/0951192X.2019.1667028

Информация об авторах

Полина Андреевна Русских, ассистент кафедры
Денис Владимирович Капулин, кандидат технических наук
Олег Владимирович Дрозд, старший преподаватель
Сергей Юрьевич Смоглюк, аспирант

Information about the Authors

Polina A. Russkikh, Assistant of the Basic Department
Denis V. Kapulin, Head of the Basic Department
Oleg V. Drozd, Senior Lecturer
Sergey Yu. Smogluk, Postgraduate Student

*Статья поступила в редакцию 11.12.2021;
одобрена после рецензирования 01.02.2022; принята к публикации 01.02.2022
The article was submitted 11.12.2021;
approved after reviewing 01.02.2022; accepted for publication 01.02.2022*